

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PAR ARTICLES PRÉSENTÉ À  
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
À L'OBTENTION DE LA  
MAÎTRISE EN GÉNIE MÉCANIQUE  
M. Ing.

PAR  
BENOIT DALPÉ

COUCHE DE SURFACE ATMOSPHÉRIQUE EN PRÉSENCE D'UN  
RECOUVREMENT FORESTIER

MONTREAL, LE 20 JANVIER 2007

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY CONSTITUÉ DE :

M. Christian Masson, directeur du mémoire  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. François Morency, président du jury  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Claude Bédard, membre du jury  
Doyen au décanat à la recherche et au transfert technologique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 16 MARS 2007

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

# **COUCHE DE SURFACE ATMOSPHÉRIQUE EN PRÉSENCE D'UN RECOUVREMENT FORESTIER**

Benoit Dalpé

## **SOMMAIRE**

Aux fins d'analyser la ressource éolienne d'un site, la première étape consiste à installer des tours anémométriques pour recueillir de l'information sur la vitesse et la direction du vent. Par la suite, en utilisant une description détaillée de la topographie et de la rugosité du site, les mesures obtenues sont extrapolées sur tout le site à l'aide de logiciels commerciaux (e.g. WAsP). Ces logiciels donnent d'excellents résultats pour des terrains relativement plats et caractérisés par une faible rugosité. Par contre, pour des terrains couverts de forêt, ces logiciels sont imprécis. Étant donné que les parcs éoliens canadiens sont installés fréquemment sur des sites où il y a présence d'un couvert forestier important, il est essentiel de développer un modèle fiable de prédiction de l'écoulement atmosphérique applicable à ces sites. L'objectif principal de ce projet est donc de développer et de valider une méthode permettant de simuler l'écoulement atmosphérique sur un terrain couvert de forêt.

La méthode proposée utilise un modèle de simulation de la dynamique des fluides (CFD) établissant une analogie entre la forêt et un milieu poreux. Les pertes de quantité de mouvement engendrées par la forêt sont représentées par un terme de source qui est défini selon un coefficient de traînée et une densité de surface foliaire. Afin de modéliser la turbulence, un modèle  $k-\epsilon$  modifié a été utilisé. Celui-ci intègre des termes de source dans les équations de  $k$  et  $\epsilon$ . Par la suite, le modèle mathématique a été résolu à l'aide du logiciel FLUENT 6.2. La méthode proposée fut validée à l'aide de mesures expérimentales obtenues par quatre auteurs différents. Cette méthode a été utilisée pour simuler deux cas : l'écoulement pleinement développé au-dessus et à l'intérieur de la forêt, et l'écoulement en bordure d'une forêt. Les résultats obtenus indiquent que la méthode proposée prédit de façon précise la vitesse du vent au-dessus et à l'intérieur de la forêt, mais sous-estime la turbulence dans la partie inférieure de la forêt. De plus, lors de la simulation de l'écoulement en bordure d'une forêt, on a discuté de la performance du logiciel WAsP. Les résultats indiquent que les prédictions de WAsP sont très variables selon la position de la station météorologique. Afin de minimiser l'erreur des prédictions de WAsP, il est recommandé de positionner la station météorologique à l'extérieur de la forêt, ou au-dessus de la forêt à une hauteur supérieure à cinq fois la hauteur de la forêt.

# ATMOSPHERIC SURFACE LAYER FLOW OVER FORESTED AREAS

Benoit Dalpé

## ABSTRACT

The first step to assess the wind resource of a proposed wind farm site is to install measurement masts to obtain wind velocity and wind direction measurements. Then a wind map of the entire site is obtained using the description of the terrain topography and surface roughness, as well as the measurements obtained at the masts locations. These measurements are then extrapolated to the entire site by using commercial softwares (e.g. WAsP). These software provide good results for relatively flat terrain characterized by small surface roughness. However, for terrain covered by forest, they are not accurate. Since more and more canadian wind farms are being installed on sites covered by forest, it is essential to develop wind prediction models that can be used over forested areas. Thus, the main goal of this project is to develop and validate a method that could be used to predict the wind flow over forested areas.

The proposed method is a Computational Fluid Dynamics (CFD) model that uses an analogy between the forest and a porous media. The momentum losses within the forest were represented by a source term in the momentum equations. The source term was represented by a drag coefficient and a leaf area density. The turbulence was modeled using a modified  $k$ - $\epsilon$  turbulence model where source terms were added to the  $k$  and  $\epsilon$  equations. The mathematical model was solved using the software FLUENT 6.2. The proposed method was validated using experimental measurements from other authors. This method was used to simulate two cases : fully developed wind flow within and above a forest, and wind flow in the neighboring of a forest edge. Results indicate that the proposed method precisely predicts the wind velocity above and within the forest, but underestimated the turbulence in the lowest part of the forest. Also, the applicability of the WAsP software near a forest edge was discussed and general recommendations were given. Results indicate that WAsP's predictions are very sensitive to the position of the meteorological station. To minimize prediction errors, it is suggested to position the meteorological station outside the forest or five times above the forest height over the forest.

## **REMERCIEMENTS**

Premièrement, je remercie l'École de technologie supérieure, et plus particulièrement monsieur le professeur Christian Masson, d'avoir dirigé ma maîtrise et de m'avoir offert la possibilité de poursuivre mes études au cycle supérieur. De plus, je remercie le professeur Masson de m'avoir supporté tout au cours de ma démarche et d'avoir su me prodiguer de judicieux conseils afin de m'aider à orienter ma démarche scientifique.

Deuxièmement, je veux remercier monsieur François Morency d'avoir accepté de présider ma soutenance, ainsi que monsieur Claude Bédard pour avoir accepté d'être membre du jury.

Au cours de mes deux années passées à l'ÉTS, j'ai pu aussi compter sur l'aide de mes collègues de travail qui ont su m'épauler lorsque j'étais dans le besoin. Plus particulièrement, mes remerciements vont à Alexandra, Benoit, Étienne, Idriss, Jean-Daniel, Jon, Jules, Khaled, Manal, Mohamed, Monelle, Nicolas et Philippe.

Je veux aussi dire un merci tout particulier à mon père, François Dalpé, et à mon papy, René Dalpé, pour leur aide lors de la révision de ce mémoire.

Finalement, un gros merci à tous les membres de ma famille pour leurs encouragements et leur amour.

Merci.

## TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE . . . . .	i
ABSTRACT . . . . .	ii
REMERCIEMENTS . . . . .	iii
TABLE DES MATIÈRES . . . . .	iv
LISTE DES TABLEAUX . . . . .	vi
LISTE DES FIGURES . . . . .	vii
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES . . . . .	x
INTRODUCTION . . . . .	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE . . . . .	3
1.1 Structure verticale de l’atmosphère . . . . .	3
1.1.1 Structure de la couche limite atmosphérique . . . . .	3
1.1.2 Stabilité thermique de la couche de surface . . . . .	4
1.2 Écoulement pleinement développé sur terrain plat . . . . .	6
1.2.1 Le profil logarithmique . . . . .	6
1.2.2 La turbulence . . . . .	8
1.3 Profil de vitesse au-dessus de la forêt . . . . .	8
1.4 Profil de vitesse dans la forêt . . . . .	9
1.5 Résultats expérimentaux disponibles dans la littérature . . . . .	9
1.5.1 Écoulements pleinement développés . . . . .	10
1.5.2 Écoulement en bordure d’une forêt . . . . .	10
1.6 Simulation numérique de l’écoulement . . . . .	11
1.6.1 WAsP . . . . .	11
1.6.1.1 Sous-modèles de WAsP . . . . .	12
1.6.1.1.1 Sous-modèle de changement de rugosité . . . . .	12
1.6.1.1.2 Sous-modèle d’orographie . . . . .	13
1.6.1.2 Modélisation de la forêt . . . . .	13
1.6.2 FLUENT 6.2 . . . . .	14
1.6.2.1 Discrétisation du domaine de calcul . . . . .	15
1.6.2.2 Linéarisation des équations de conservation . . . . .	15
1.6.2.3 Schéma d’interpolation . . . . .	17

1.6.2.4	Corrélation entre la vitesse et la pression . . . . .	17
1.6.2.5	Résolution du système d'équations discrétisées . . . . .	18
1.6.2.6	Modélisation de la forêt . . . . .	19
1.6.2.7	Modélisation de la turbulence . . . . .	21
CHAPITRE 2	ÉCOULEMENT PLEINEMENT DÉVELOPPÉ . . . . .	23
2.1	Modèle mathématique . . . . .	23
2.2	Méthode numérique . . . . .	25
2.2.1	Conditions aux frontières . . . . .	25
2.3	Résultats . . . . .	26
CHAPITRE 3	ÉCOULEMENT EN BORDURE D'UNE FORÊT . . . . .	27
3.1	Modèle mathématique . . . . .	27
3.2	Méthode numérique . . . . .	29
3.2.1	Conditions aux frontières (écoulement entrant dans la forêt) . . .	29
3.2.2	Conditions aux frontières (écoulement sortant de la forêt) . . . .	29
3.3	Résultats . . . . .	30
CHAPITRE 4	UTILISATION DE WASP POUR L'ÉCOULEMENT EN BORDURE D'UNE FORÊT . . . . .	31
4.1	Mesures expérimentales . . . . .	31
4.2	Simulations CFD . . . . .	31
4.3	WAsP . . . . .	32
4.4	Résultats . . . . .	32
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	. . . . .	33
ANNEXE 1	NUMERICAL STUDY OF FULLY DEVELOPED TURBULENT FLOW WITHIN AND ABOVE A DENSE FOREST . . . . .	35
ANNEXE 2	NUMERICAL SIMULATION OF WIND FLOW NEAR A FOREST EDGE . . . . .	55
ANNEXE 3	RECOMMENDED PRACTICES WHEN ANALYZING WIND FLOW NEAR A FOREST EDGE WITH WASP . . . . .	88
BIBLIOGRAPHIE	. . . . .	110

## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I    Hauteurs de rugosité ( $z_o$ ) typiques . . . . .	5
Tableau II    Critères de stabilité thermique de l'atmosphère . . . . .	6
Tableau III $\phi$ , $\Gamma$ et S pour les équations de conservation . . . . .	16
Tableau IV    Constantes originales du modèle $k - \epsilon$ . . . . .	25
Tableau V    Constantes du modèle $k - \epsilon$ modifié . . . . .	25



## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1    Structure de la couche limite atmosphérique . . . . .	4
Figure 2    Représentation de la forêt dans WAsP . . . . .	14
Figure 3    Position des centroïdes des cellules adjacentes au volume de contrôle . .	17
Figure 4    Étapes de la résolution séquentielle des équations linéarisées . . . . .	19

## LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

$C$	Constante d'intégration
$C_D$	Coefficient de traînée
$C_p$	Chaleur spécifique à pression constante de l'air, $[J/Kg \cdot K]$
$C_{\epsilon 1}$	Constante du modèle de turbulence $k - \epsilon$
$C_{\epsilon 2}$	Constante du modèle de turbulence $k - \epsilon$
$C_{\epsilon 4}$	Constante du modèle de turbulence $k - \epsilon$ modifié
$C_{\epsilon 5}$	Constante du modèle de turbulence $k - \epsilon$ modifié
$C_\mu$	Constante du modèle de turbulence $k - \epsilon$
CFD	Simulation numérique de la dynamique des fluides
CLI	Couche limite interne
$G_k$	Terme de production due à la déformation
K	Constante de von Karman
LAI	Indice de surface foliaire (Leaf Area Index)
LES	Simulation des grands tourbillons (Large Eddy Simulation)
$R_\phi$	Résidu normalisé
$S$	Terme de source
$S_C$	Partie constante du terme de source
$S_\epsilon$	Terme de source de l'équation de $\epsilon$
$S_k$	Terme de source de l'équation de $k$
$S_P$	Coefficient de la variable d'intérêt dans le terme de source
$S_{u,i}$	Terme de source de l'équation de la quantité de mouvement
T	Température, [K]
$TI_{ref}$	Intensité de turbulence référence
UDF	Fonction d'utilisateur de FLUENT 6.2 (User-Defined Function)
UDS	Scalaire de FLUENT 6.2 (User-Defined Scalar)

$a_{nb}$	Coefficient de la variable d'intérêt aux cellules voisines
$a_P$	Coefficient de la variable d'intérêt au point de calcul
$b$	Constante de l'équation linéarisée
$d$	Hauteur de déplacement, [m]
$f$	Coefficient de transition
$f_c$	Paramètre de Coriolis
$g$	Accélération gravitationnelle, [ $m/s$ ]
$h$	Hauteur de la forêt, [m]
$k$	Énergie cinétique turbulente (TKE), [ $J/m^3$ ]
$k_{fs}$	$k$ calculée avec une condition de mur glissant, [ $J/m^3$ ]
$k_n$	$k$ au centroïde de la dernière cellule, [ $J/m^3$ ]
$k_{ref}$	Énergie cinétique turbulente de référence, [ $J/m^3$ ]
$k_{zo}$	$k$ calculée avec le profil logarithmique, [ $J/m^3$ ]
$k_1$	Valeur de $k$ au centroïde de la première cellule près du sol, [ $J/m^3$ ]
$k_2$	Valeur de $k$ au centroïde de la deuxième cellule près du sol, [ $J/m^3$ ]
$p$	Pression, [Pa]
$ u $	Norme de la vitesse, [ $m/s$ ]
$u_{fs}$	Vitesse calculée avec une condition de mur glissant, [ $m/s$ ]
$u_h$	Vitesse au sommet de la forêt, [ $m/s$ ]
$u_i$	Vitesse dans la direction $i$ , [ $m/s$ ]
$\overline{u'_i u'_j}$	Flux turbulent de la quantité de mouvement
$u_n$	Vitesse au centroïde de la dernière cellule, [ $m/s$ ]
$u_{n-1}$	Vitesse au centroïde de l'avant-dernière cellule, [ $m/s$ ]
$u_{ref}$	Vitesse de référence, [ $m/s$ ]
$u_{top}$	Vitesse au sommet du domaine, [ $m/s$ ]
$u_{zo}$	Vitesse calculée avec le profil logarithmique, [ $m/s$ ]
$u_1$	Vitesse au centroïde de la première cellule près du sol, [ $m/s$ ]

$u_2$	Vitesse au centroïde de la deuxième cellule près du sol, $[m/s]$
$u_*$	Vitesse de friction, $[m/s]$
$u_{*,fd}$	Vitesse de friction de l'écoulement pleinement développé, $[m/s]$
$u_{*,g}$	Vitesse de friction au sol, $[m/s]$
$u_{*,l}$	Vitesse de friction locale, $[m/s]$
$u_{*,l,edge}$	Vitesse de friction locale calculée au bord de la forêt, $[m/s]$
$u_{*,ref}$	Vitesse de friction de référence, $[m/s]$
$u_{*,top}$	Vitesse de friction au sommet du domaine, $[m/s]$
$u_{*1}$	Vitesse de friction en aval du changement de rugosité, $[m/s]$
$u_{*2}$	Vitesse de friction en amont du changement de rugosité, $[m/s]$
$x$	Position horizontale, $[m]$
$z$	Hauteur par rapport au sol, $[m]$
$z_n$	Hauteur du centroïde de la dernière cellule, $[m]$
$z_{n-1}$	Hauteur du centroïde de l'avant-dernière cellule, $[m]$
$z_o$	Hauteur de rugosité, $[m]$
$z_{o1}$	Hauteur de rugosité en aval du changement de rugosité, $[m]$
$z_{o2}$	Hauteur de rugosité en amont du changement de rugosité, $[m]$
$z_{top}$	Hauteur du sommet du domaine, $[m]$
$z_1$	Hauteur du centroïde de la première cellule près du sol, $[m]$
$z_2$	Hauteur du centroïde de la deuxième cellule près du sol, $[m]$
$\alpha$	Densité de surface foliaire (leaf area density), $[m^2/m^3]$
$\alpha$	Perméabilité d'un milieu poreux, $[m^2]$
$\beta$	Passabilité d'un milieu poreux, $[m^2]$
$\beta_p$	Constante du modèle de turbulence $k - \epsilon$ modifié
$\beta_d$	Constante du modèle de turbulence $k - \epsilon$ modifié
$\delta$	Hauteur de la couche limite interne, $[m]$
$\delta_{ij}$	Symbole de Kronecker

$\Delta x$	Grandeur de maille dans la direction $x$ , $[m]$
$\Delta z$	Grandeur de maille dans la direction $z$ , $[m]$
$\epsilon$	Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente, $[J/(m^3 \cdot s)]$
$\epsilon_{fs}$	$\epsilon$ calculé avec une condition de mur glissant, $[J/(m^3 \cdot s)]$
$\epsilon_{ijk}$	Symbole de permutation
$\epsilon_n$	$\epsilon$ au centroïde de l'avant-dernière cellule, $[J/(m^3 \cdot s)]$
$\epsilon_{zo}$	$\epsilon$ calculé avec le profil logarithmique, $[J/(m^3 \cdot s)]$
$\epsilon_1$	Valeur de $\epsilon$ au centroïde de la première cellule près du sol, $[J/(m^3 \cdot s)]$
$\epsilon_2$	Valeur de $\epsilon$ au centroïde de la deuxième cellule près du sol, $[J/(m^3 \cdot s)]$
$\gamma$	Coefficient d'atténuation
$\Gamma$	Coefficient de diffusion
$\mu$	Viscosité laminaire, $[kg/(m \cdot s)]$
$\mu_t$	Viscosité tourbillonnaire, $[kg/(m \cdot s)]$
$\phi$	Variable d'intérêt
$\phi_E$	Variable d'intérêt dans la cellule est
$\phi_e$	Variable d'intérêt à la frontière de la cellule est
$\phi_N$	Variable d'intérêt dans la cellule nord
$\phi_n$	Variable d'intérêt à la frontière de la cellule nord
$\phi_{nb}$	Variable d'intérêt aux cellules voisines
$\phi_P$	Variable d'intérêt au point de calcul
$\phi_S$	Variable d'intérêt dans la cellule sud
$\phi_s$	Variable d'intérêt à la frontière de la cellule sud
$\phi_W$	Variable d'intérêt dans la cellule ouest
$\phi_w$	Variable d'intérêt à la frontière de la cellule ouest
$\rho$	Densité de l'air, $[kg/m^3]$
$\sigma_k$	Constante du modèle de turbulence $k - \epsilon$
$\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$	Écart-type de la vitesse, $[m/s]$

$\sigma_\epsilon$	Constante du modèle de turbulence $k - \epsilon$
$\tau$	Cisaillement, [Pa]
$\theta$	Température potentielle, [K]

## INTRODUCTION

### Mise en contexte

Avec une croissance annuelle d'environ 32% au cours des cinq dernières années [4], l'énergie éolienne fait partie des sources d'énergie renouvelable qui progressent le plus rapidement. Étant une énergie propre, abondante, entièrement renouvelable, fiable et relativement économique à produire, l'énergie éolienne s'impose de plus en plus comme une alternative viable à la génération d'électricité par les combustibles fossiles. Afin de soutenir cette croissance et de réduire les coûts d'exploitation des parcs éoliens, il est impératif de bien caractériser la ressource éolienne. Les modèles présentement utilisés au sein de l'industrie de l'énergie éolienne [5, 6, 7] sont bien adaptés pour des terrains relativement plats où la rugosité du sol est inférieure à environ un mètre. Dans le cas de parcs éoliens installés dans des régions où le couvert forestier est important, les modèles existants ne permettent pas de tenir compte adéquatement de l'influence de la forêt sur l'écoulement atmosphérique.

### Objectifs et méthodologie

L'objectif de ce mémoire est de développer un modèle qui permet de simuler l'écoulement atmosphérique au-dessus et à l'intérieur d'une forêt. Pour ce faire, on utilisera une approche de simulation numérique CFD (Computational Fluid Dynamics). Le logiciel FLUENT 6.2 sera utilisé afin de résoudre les équations de conservation. Un modèle de turbulence  $k - \epsilon$  modifié tenant compte de la génération de la turbulence par la forêt sera utilisé. La méthode proposée sera validée à l'aide de mesures expérimentales disponibles dans la littérature. La méthode proposée sera aussi comparée à un logiciel d'analyse de la ressource éolienne largement utilisé par l'industrie éolienne : WAsP.

Les retombées principales de ce projet seront nombreuses :

- Meilleure compréhension de l'impact de la forêt sur l'écoulement atmosphérique ;
- Meilleure compréhension de l'impact de la forêt sur les performances des éoliennes ;
- Meilleure micro-localisation des éoliennes dans les parcs éoliens.

## **Structure du mémoire**

Le Chapitre 1 présente une revue de la littérature relative à la structure de l'atmosphère, aux expressions analytiques définissant la vitesse du vent et la turbulence de l'atmosphère, et aux résultats expérimentaux disponibles dans la littérature. Ce chapitre présente aussi une description détaillée des deux modèles de simulation numérique qui seront utilisés dans ce travail. Par la suite, la simulation numérique d'un écoulement pleinement développé au-dessus et à l'intérieur d'une forêt, et la simulation numérique de l'écoulement en bordure d'une forêt sont présentées au Chapitre 2 et au Chapitre 3. Le Chapitre 4 présente une comparaison entre la méthode proposée et le logiciel WASP, et émet des recommandations sur l'utilisation de WASP en bordure d'une forêt. Finalement, la validité de la méthode proposée et les contributions de ce travail sont examinées dans la section conclusion et recommandations.



## **CHAPITRE 1**

### **REVUE DE LA LITTÉRATURE**

#### **1.1 Structure verticale de l'atmosphère**

L'atmosphère terrestre se compose de quatre couches : la troposphère, la stratosphère, la mésosphère et la thermosphère. De ces quatre couches, la troposphère mérite une attention toute particulière, puisque cette couche est la plus près de la surface terrestre. Il est donc impératif de la caractériser avec précision afin d'évaluer la ressource éolienne. La troposphère se divise en deux régions distinctes : la couche limite et l'atmosphère libre [8]. L'atmosphère libre est située juste au-dessus de la couche limite et est caractérisée par de forts vents : les vents géostrophiques. Dans l'atmosphère libre, les contraintes visqueuses (forces de frottement créées par l'interaction entre l'atmosphère et le sol) sont négligeables. La couche limite atmosphérique s'étend de la surface terrestre jusqu'à une altitude d'environ 1 km. Il est à noter que la hauteur de la couche limite est très variable et dépend de plusieurs facteurs dont la rugosité du terrain et la stabilité thermique de l'atmosphère.

##### **1.1.1 Structure de la couche limite atmosphérique**

La couche limite atmosphérique peut se diviser en trois régions distinctes : la couche d'Ekman, la couche de surface et la sous-couche rugueuse, comme le montre la Fig. 1 [8]. La couche d'Ekman est située au sommet de la couche limite atmosphérique. Dans cette couche, la force de Coriolis (force créée par la rotation de la Terre), les forces de flottabilité dues à la stratification thermique et les forces visqueuses influencent significativement l'écoulement.

La couche de surface est une région de la couche limite où la force de Coriolis est négligeable par rapport aux forces visqueuses. La vitesse du vent y est très dépendante de la stabilité thermique. La couche de surface représente environ 10% de la hauteur de la couche limite et est une zone de grand intérêt pour les études reliées à l'énergie éolienne.

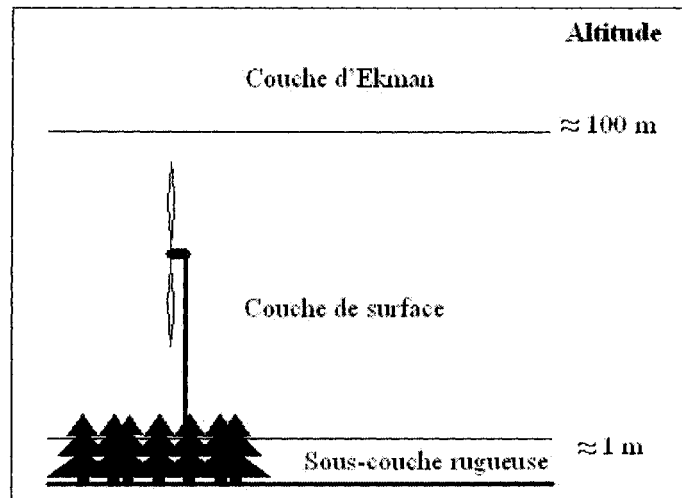


Figure 1 Structure de la couche limite atmosphérique

La sous-couche rugueuse est la partie de la couche limite atmosphérique qui est en contact direct avec le sol, et rencontre les irrégularités du sol telles que l'herbe, les roches et les arbres. Cette zone est d'une importance capitale puisqu'elle définit les paramètres du cisaillement du vent. En d'autres mots, la distribution verticale du vent ne sera pas la même si le terrain est un champ, une forêt ou une ville avec de grands édifices. Cette sous-couche rugueuse est généralement définie par une hauteur de rugosité ( $z_o$ ). Par définition, la hauteur de rugosité est définie comme la hauteur à laquelle le profil vertical de la vitesse du vent, extrapolé vers le bas, donne une vitesse nulle. Le Tableau I présente quelques hauteurs de rugosité typiques [8].

### 1.1.2 Stabilité thermique de la couche de surface

La stabilité thermique de la couche de surface représente l'influence de la température sur la vitesse du vent et sur la turbulence. Il existe trois cas de stabilité thermique : stable, instable ou neutre. Dans une atmosphère stable, la variation verticale de température tend à atténuer la turbulence atmosphérique, tandis qu'une atmosphère instable tend à augmenter cette turbulence. Dans le cas particulier d'une atmosphère neutre, la température n'a aucun effet sur la turbulence. Pour mieux comprendre la stabilité thermique de l'atmosphère, il

Tableau I  
Hauteurs de rugosité ( $z_o$ ) typiques

Type de paysage	Hauteur de rugosité (m)
Glace lisse	0.00001
Surface d'eau calme	0.0002
Surface d'eau agitée	0.0005
Neige	0.003
Pelouse coupée	0.008
Pâturage	0.01
Jachère	0.03
Terrain en culture	0.05
Quelques arbres	0.1
Plusieurs arbres et quelques bâtiments	0.25
Forêt	0.5
Banlieue	1.5
Centre-ville	3.0

est nécessaire de définir une nouvelle température : la température potentielle ( $\theta$ ).

$$\theta = T + \frac{g}{C_p} z \quad (1.1)$$

où

- $T$  est la température en Kelvin ;
- $g$  est l'accélération gravitationnelle ( $9.8 \text{ m/s}$ ) ;
- $C_p$  est la chaleur spécifique à pression constante de l'air ;
- $z$  est la hauteur par rapport au sol.

La stabilité thermique peut être définie par la variation de la température potentielle en fonction de la hauteur, comme le montre le Tableau II.

Tableau II

Critères de stabilité thermique de l'atmosphère

Type	Critère
Stable	$\partial\theta/\partial z > 0$
Instable	$\partial\theta/\partial z < 0$
Neutre	$\partial\theta/\partial z = 0$

## 1.2 Écoulement pleinement développé sur terrain plat

### 1.2.1 Le profil logarithmique

À partir de l'équation de conservation de la quantité de mouvement, il est possible d'obtenir une expression analytique du profil de vitesse pleinement développé pour une couche de surface neutre sur terrain plat. En notation indicielle, l'équation de conservation de la quantité de mouvement dans l'atmosphère s'écrit comme il suit [9] :

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\rho \delta_{i3} g + \rho f_c \epsilon_{ij3} u_j - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (1.2)$$

Afin de simplifier cette équation, certaines approximations sont de mise :

1. Le système de coordonnées est orienté de sorte que l'axe des  $x$  pointe dans la direction de l'écoulement ;
2. La composante verticale de vitesse est nulle ;
3. L'écoulement atmosphérique est pleinement développé ;
4. Le terme de coriolis est négligeable ;
5. Le gradient de pression est nul.

L'équation (1.2) simplifiée peut s'écrire comme il suit :

$$\mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{\partial}{\partial z} (\rho \overline{u'w'}) = 0 \quad (1.3)$$

où  $u$  est la vitesse dans la direction de l'écoulement et  $z$  est la hauteur par rapport au sol.

En intégrant l'équation (1.3) par rapport à  $z$ , l'équation (1.4) est obtenue :

$$\mu \frac{\partial u}{\partial z} - \overline{\rho u' w'} = C \quad (1.4)$$

où  $C$  est une constante d'intégration.

On peut modéliser le flux turbulent de quantité de mouvement ( $\overline{\rho u' w'}$ ) en faisant appel au concept de viscosité tourbillonnaire, comme il suit :

$$-\overline{\rho u' w'} = \mu_t \frac{\partial u}{\partial z} \quad (1.5)$$

où  $\mu_t$  est la viscosité tourbillonnaire.

En substituant l'équation (1.5) dans (1.4), une équation pour la constante d'intégration peut être obtenue.

$$C = (\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial z} \quad (1.6)$$

De plus, des mesures expérimentales ont montrées que pour une couche de surface neutre la viscosité turbulente peut être approximée par l'équation (1.7) [10] :

$$\mu_t = \rho K u_* z \quad (1.7)$$

où

- $K$  est la constante de von Karman ( $K \approx 0.42$ ) ;
- $u_*$  est la vitesse de friction.

$$u_* = \sqrt{-\overline{u' w'}} \quad (1.8)$$

En négligeant  $\mu$  par rapport à  $\mu_t$ , il est possible de trouver le profil logarithmique décrivant le profil de vitesse pour une couche de surface sur terrain plat, dans des conditions de stabilité thermique neutre :

$$u = \frac{u_*}{K} \ln \left( \frac{z}{z_o} \right) \quad (1.9)$$

### 1.2.2 La turbulence

En plus de l'expression algébrique pour le profil de vitesse (Eq. (1.9)), il existe des expressions analytiques permettant de définir la distribution de l'énergie cinétique turbulente ( $k$ ) et du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ( $\epsilon$ ), pour une couche de surface neutre. Panofsky et Dutton [10] ont défini la distribution de  $k$  et  $\epsilon$  comme il suit :

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (1.10)$$

$$\epsilon = \frac{u_*^3}{Kz} \quad (1.11)$$

où  $C_\mu$  est une constante du modèle de turbulence  $k - \epsilon$ . Il est à noter que ces profils de  $k$  et  $\epsilon$  sont valides seulement pour une couche limite neutre où la rugosité du sol est faible [10]. Il n'existe pas d'expression analytique décrivant les profils de  $k$  et  $\epsilon$  au-dessus de la forêt.

### 1.3 Profil de vitesse au-dessus de la forêt

Selon Kaimal [11], et Panofsky et Dutton [10], une façon adéquate de représenter la vitesse du vent au-dessus d'une forêt consiste à utiliser l'équation suivante :

$$u = \frac{u_*}{K} \ln \left( \frac{z - d}{z_o} \right) \quad (1.12)$$

où

- $d$  est la hauteur de déplacement.

L'équation (1.12) est très similaire à l'équation (1.9) à la différence que l'équation (1.12) fait intervenir une hauteur de déplacement  $d$ . Les variables  $z_o$  et  $d$  dépendent du type de forêt considéré. Dans la littérature, il existe plusieurs façons de définir  $z_o$  et  $d$ . La méthode la plus simple est d'utiliser la hauteur moyenne du couvert forestier ( $h$ ). Kaimal [11] propose  $z_o \approx 0.2h$ , Pinard [12] propose  $z_o \approx 0.1h$ , alors que Garratt [13] propose  $z_o \approx 0.125h$ . Pour  $d$ , Kaimal [11], Pinard [12] et Garratt [13] proposent tous  $d \approx 0.75h$  qui a été obtenu en égalant  $d$  à la hauteur du centre de pression de la forêt. Massman [14], Yang et Fienl [15], Lalic et al. [16] utilisent quant à eux différentes mesures de la densité

de la forêt, en plus de la hauteur de la forêt, afin de définir  $z_o$  et  $d$ . L'approche basée sur l'équation (1.12) donne des résultats intéressants seulement si  $z_o$  et  $d$  sont évalués de façon précise [11].

#### 1.4 Profil de vitesse dans la forêt

Selon Amiro [17] et Pinard [12], il existe une relation empirique qui est approximativement le profil de vitesse à l'intérieur d'une forêt horizontalement uniforme :

$$u = u_h \exp \left[ \gamma \left( \frac{z}{h} - 1 \right) \right] \quad (1.13)$$

où

- $u_h$  est la vitesse au sommet de la forêt ( $z = h$ );
- $\gamma$  est le coefficient d'atténuation.

Le désavantage principal de cette relation c'est qu'il est nécessaire de définir la vitesse au sommet de la forêt. Dans la plupart des cas, cette vitesse est inconnue. De plus, cette équation implique l'utilisation d'un coefficient d'atténuation  $\gamma$  qui est difficilement évaluable. Selon les mesures expérimentales obtenues par Amiro [17],  $\gamma$  avait une valeur de 4.8 pour une forêt d'épinettes, 3.2 pour une forêt de trembles, et 2.6 pour une forêt de pins. Un autre problème relié à l'utilisation de cette relation est qu'elle n'est valide que pour  $0.6 < z/h < 1$  [18]. Elle n'établit qu'une approximation douteuse de la partie inférieure de l'écoulement dans la forêt.

#### 1.5 Résultats expérimentaux disponibles dans la littérature

Les résultats expérimentaux disponibles dans la littérature peuvent être divisés en deux catégories : les écoulements pleinement développés, et les écoulement en bordure d'une forêt. Les mesures expérimentales des écoulements pleinement développés ont été obtenues au centre d'une forêt de très grande dimension, de sorte que les effets de bord n'affectent pas les mesures. Les mesures obtenues en bordure d'une forêt analysent quant à eux l'écoulement près de la transition entre une forêt et un terrain où la rugosité est beaucoup plus faible.

### 1.5.1 Écoulements pleinement développés

En 1990, Meyers et Baldocchi [19] ont effectué des mesures de vitesse et de turbulence dans une forêt mixte composée de chêne, de noyers et de pins, tandis qu'Amiro [20] a effectué des mesures sur trois forêts types de la forêt boréale. De plus, l'étude d'Amiro [20] présente la distribution détaillée de la densité de surface foliaire pour les trois forêts. Une autre étude expérimentale est celle de Svensson et Haggkvist [21]. Ces derniers ont effectué des mesures de vitesse et de turbulence pour une forêt type d'un verger jusqu'à une hauteur de 6 fois la hauteur de la forêt. Dans cette étude, aucune mesure de la densité de surface foliaire de la forêt n'est donnée. Par la suite, en 1994, Gardiner [22] a obtenu une mesure détaillée de la densité de surface foliaire d'une forêt d'épinettes d'une hauteur variant entre 12 et 15 m. De plus, des mesures de vitesse et de turbulence pour des hauteurs allant jusqu'à 2 fois la hauteur de la forêt ont été obtenues. Par la suite, en 1998, Kelliher et al. [23] ont obtenus des mesures de vitesse et de turbulence pour une forêt de pins de 20 m de hauteur en Sibérie. Finalement, en 1998, Katul [24] a obtenu des mesures de vitesse et de turbulence pour une forêt de pins en Caroline du Nord, aux États-Unis. La forêt avait une hauteur de 14 m et une mesure de l'indice de surface foliaire (LAI) était donnée.

### 1.5.2 Écoulement en bordure d'une forêt

Les mesures expérimentales obtenues en bordure d'une forêt sont peu nombreuses. En 1971, Raynor [2] a obtenu des mesures de vitesse près d'une transition entre une forêt de pins de 10,5 m de hauteur et un champ composé de gazon et de petits arbustes. Dans cette étude, la hauteur de rugosité du champs et la distribution de la densité de surface foliaire de la forêt de pins n'étaient pas données. Les mesures de vitesse ont été obtenues jusqu'à une hauteur de 13,5 m. Par la suite, en 1986, des mesures de vitesse et de turbulence ont été obtenues par Gash [3] près d'une transition entre une forêt de pins et un champ composé de bruyère. La rugosité du champ ( $z_o=0,028$  m) et la distribution de la densité de surface foliaire de la forêt étaient données. En 1996, Liu et al. [25] ont effectué des mesures en soufflerie afin de simuler l'écoulement sortant d'une forêt. Des mesures de vitesse et de turbulence ont été obtenues. Finalement, en 1997, Irvine et al. [1] ont mesuré l'évolution de l'écoulement atmosphérique entrant dans une forêt d'épinettes de 7,5 m de hauteur. Des



mesures de vitesse et de turbulence ont été obtenues pour des hauteurs allant jusqu'à 15 m. Une mesure de l'indice de surface foliaire était donnée.

## **1.6 Simulation numérique de l'écoulement**

Il existe deux grandes familles de modèles permettant de simuler l'écoulement atmosphérique pour des applications éoliennes : les modèles linéarisés et les modèles numériques de la dynamique de l'écoulement des fluides (CFD). Les modèles linéarisés utilisent des relations algébriques, analytiques ou empiriques, afin de prédire l'écoulement atmosphérique. Les modèles CFD résolvent de façon numérique les équations de conservation afin de simuler l'écoulement atmosphérique. Les principaux avantages des modèles linéarisés sont leur rapidité d'exécution et leur simplicité. Par contre, ces modèles sont reconnus pour être moins précis que les modèles CFD, car ils ne permettent pas de tenir compte de tous les paramètres physiques influençant l'écoulement atmosphérique. À l'opposé, les modèles CFD sont plus complexes et plus précis que les modèles linéarisés. Par contre, ils sont beaucoup plus lents à exécuter et requièrent une compréhension beaucoup plus grande de la physique de l'écoulement. Les modèles linéarisés sont sans contredit les plus populaires présentement au sein de l'industrie de l'énergie éolienne. Les modèles les plus utilisés sont disponibles sous forme de logiciels facile à utiliser (WAsP [5] et WindPro [6]). Les modèles CFD sont beaucoup plus populaires au sein de la communauté universitaire. L'un des logiciels utilisés pour la simulation de l'écoulement atmosphérique est FLUENT 6.2 [26]. Dans ce travail, les logiciels WAsP [5] et FLUENT 6.2 [26] ont été utilisés. Un résumé du fonctionnement de ces logiciels est fourni dans cette Section.

### **1.6.1 WAsP**

WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) est un logiciel qui a été développé par le laboratoire Risoe du Danemark. Ce logiciel est présentement utilisé au sein de l'industrie éolienne afin d'obtenir une prédiction du vent sur un terrain en vue d'obtenir un estimé du potentiel éolien. Pour ce faire, la vitesse et la direction du vent sous forme de série temporelle, et une description détaillée (orographie, rugosité et obstacles) du terrain sont utilisées.

### 1.6.1.1 Sous-modèles de WAsP

Pour prédire le vent sur le terrain considéré, le logiciel WAsP extrapole les mesures de vent, obtenues des tours anémométriques, à l'aide de quatre sous-modèles [27] :

- Stabilité thermique ;
- Obstacle ;
- Changement de rugosité ;
- Orographie.

Des quatre sous-modèles présentés ci-dessus, seuls les sous-modèles de changement de rugosité et d'orographie seront utilisés. Le sous-modèle de stabilité ne sera pas utilisé puisque les écoulements analysés dans ce mémoire sont de stabilité thermique neutre. Le sous-modèle d'obstacle ne sera pas utilisé, car les terrains considérés dans ce mémoire ne présentent pas d'obstacle. Une description plus détaillée des quatre sous-modèles est présentée dans l'Atlas européen [27].

#### 1.6.1.1.1 Sous-modèle de changement de rugosité

Le profil logarithmique représenté par l'équation (1.9) n'est valide que sur un terrain relativement homogène, où la hauteur de rugosité est approximativement constante. Dans le cas d'un terrain où il y a un changement de rugosité, l'équation (1.9) n'est plus valide. Lors de la présence d'un changement de rugosité, la couche de surface doit s'adapter afin de retrouver l'équilibre. Ce retour vers un écoulement en équilibre se fait graduellement et il y a formation d'une couche limite interne (CLI). Au sein de cette CLI, l'écoulement est représentatif de la nouvelle rugosité et, en dehors de la CLI, l'écoulement est représentatif de la rugosité en amont. La hauteur ( $\delta$ ) de la CLI est définie comme la hauteur à laquelle la vitesse de l'écoulement représente 99% de la vitesse en amont de la transition. Une relation empirique définissant la hauteur de cette CLI, en fonction de la position en aval de la transition, est donnée par l'équation suivante [27] :

$$\frac{\delta}{z'_o} \left( \ln \frac{\delta}{z'_o} - 1 \right) = 0.9 \frac{x}{z'_o} \quad (1.14)$$

où

$$z'_o = \max(z_{o1}, z_{o2}) \quad (1.15)$$

$x$  est la distance en aval du changement de rugosité, et  $z_{o1}$  et  $z_{o2}$  sont les rugosités en amont et en aval de la transition.

De plus, le profil de vitesse perturbé par le changement de rugosité est modélisé par les trois fonctions logarithmiques suivantes [27] :

$$u = \begin{cases} u' \ln \left( \frac{z}{z_{o1}} \right) / \ln \left( \frac{0.3\delta}{z_{o1}} \right) & z \geq 0.3\delta \\ u'' + (u' - u'') \ln \left( \frac{z}{0.09\delta} \right) / \ln \left( \frac{0.3}{0.09} \right) & 0.09\delta \leq z \leq 0.3\delta \\ u'' \ln \left( \frac{z}{z_{o2}} \right) / \ln \left( \frac{0.09\delta}{z_{o2}} \right) & z \leq 0.09\delta \end{cases} \quad (1.16)$$

où

$$u' = \frac{u_{*1}}{K} \ln \left( \frac{0.3\delta}{z_{o1}} \right) \quad (1.17)$$

$$u'' = \frac{u_{*2}}{K} \ln \left( \frac{0.09\delta}{z_{o2}} \right) \quad (1.18)$$

Il est à noter que le sous-modèle de changement de rugosité n'accepte pas de hauteur de rugosité supérieure à 1 m.

#### 1.6.1.1.2 Sous-modèle d'orographie

Le modèle d'orographie de WASP permet de prédire l'effet de la topographie sur la vitesse du vent. Tout lecteur intéressé par les détails de ce sous-modèle peut se référer à l'Atlas européen [28] ou à l'article de Walmsley et al. [29]. Le sous-modèle d'orographie a été développé afin de tenir compte des ondulations d'un terrain relativement plat où les longueurs caractéristiques horizontales sont de l'ordre de plusieurs dizaines de kilomètres. Dans le cas d'un terrain dont l'inclinaison dépasse 30%, les résultats obtenus par WASP ne peuvent pas être considérés comme fiables [30].

#### 1.6.1.2 Modélisation de la forêt

Une approche souvent utilisée [10, 11] afin de représenter l'effet de la forêt sur l'écoulement du vent est l'introduction d'une hauteur de déplacement ( $d$ ) (voir équation (1.12)). Cette hauteur de déplacement est habituellement définie comme étant de 65 à 75 % la hau-

teur de la forêt [11, 12, 13, 27]. L'approche proposée par le laboratoire Risoe [31, 32] est d'augmenter la hauteur du sol afin que celui-ci soit égal à la hauteur de déplacement de la forêt. Afin d'obtenir une solution réaliste en bordure de la forêt, il est nécessaire d'incliner la bordure de la forêt sur une distance équivalente à cinq hauteurs de déplacement [31] tel que présenté à la Fig. 2. La hauteur de rugosité pour la forêt est définie comme  $z_o \approx 0.1h$  [12, 27], où  $h$  est la hauteur de la forêt.

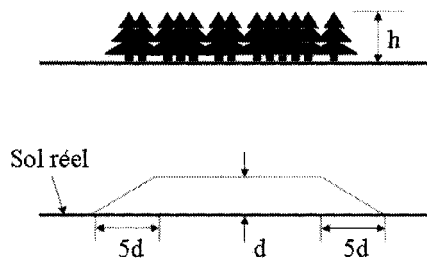


Figure 2 Représentation de la forêt dans WASP

### 1.6.2 FLUENT 6.2

Afin de résoudre de façon numérique l'écoulement du vent à l'intérieur et au-dessus d'une forêt, le logiciel commercial FLUENT 6.2 a été utilisé. Les principales raisons du choix du logiciel FLUENT 6.2 sont les suivantes :

- Possibilité de définir des fonctions d'utilisateur (User-Defined Functions ou UDF) afin d'ajouter des termes de source ou de modifier les conditions aux frontières ;
- Possibilité d'utiliser plusieurs modèles de turbulence dont le modèle de turbulence  $k - \epsilon$  ;
- Possibilité de diviser le domaine de calcul en zones dont les caractéristiques peuvent être spécifiées de façon indépendante ;
- Possibilité d'utiliser un maillage structuré ou non-structuré ;
- Plusieurs schémas de discrétisation sont disponibles ;
- Plusieurs corrélations entre la vitesse et la pression sont disponibles ;

- Logiciel accessible sous forme d'une licence accordée à l'École de Technologie Supérieure ;
- Documentation fournie par la compagnie FLUENT Inc. ;
- Le logiciel a démontré sa capacité à modéliser de façon adéquate la couche de surface atmosphérique [33, 34].

### 1.6.2.1 Discrétisation du domaine de calcul

Il est nécessaire de discrétiser le domaine de calcul, car cela permet de séparer un grand domaine de calcul en petits volumes. Ces volumes sont aussi appelés volumes de contrôle, cellules ou mailles. Pour chacun de ces petits volumes, les équations de conservation sont résolues. Leur taille a un impact direct sur la précision des résultats et sur le temps de calcul. Des volumes de contrôle trop gros auront un temps de calcul très faible, mais un faible niveau de précision. À l'opposé, des volumes de contrôle trop petits seront très précis, mais nécessiteront un temps de calcul excessif. Il est donc nécessaire de trouver, pour chaque problème, la taille des volumes de contrôle qui permet d'obtenir une solution précise tout en nécessitant un temps de calcul raisonnable. Pour générer les maillages, le logiciel Gambit 2.2 a été utilisé. Il s'agit d'un logiciel compatible avec FLUENT 6.2 et qui permet la création des maillages et des zones.

### 1.6.2.2 Linéarisation des équations de conservation

Afin de résoudre de façon numérique les équations de conservation dans chacun des volumes de contrôle, FLUENT 6.2 discrétise les équations de conservation. Afin de bien comprendre la discrétisation des équations de conservation, il est nécessaire de définir la forme plus générale des équations de conservation [35] :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \phi) = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S \quad (1.19)$$

Dans cette équation, la variable  $\phi$  représente la variable d'intérêt. Dans le cas d'un écoulement atmosphérique neutre, où la turbulence est modélisée à l'aide du modèle  $k - \epsilon$ , les variables d'intérêt sont la vitesse, l'énergie cinétique turbulente ( $k$ ) ainsi que son taux de dissipation ( $\epsilon$ ). De plus, dans le cas d'un écoulement stationnaire, le premier terme sera

nul. Il est à noter que le terme de source  $S$  peut être dépendant de la variable d'intérêt  $\phi$  comme le montre l'équation (1.20).

$$S = S_C + S_P \phi \quad (1.20)$$

Dans le cas de l'écoulement de la couche de surface atmosphérique, les différents termes de l'équation (1.19) sont présentés dans le Tableau III. Par la suite, l'équation (1.19) peut

Tableau III

$\phi$ ,  $\Gamma$  et  $S$  pour les équations de conservation

Équation	$\phi$	$\Gamma$	$S$
Continuité	1	0	0
Quantité de mouvement	$u_i$	$\mu + \mu_T$	$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + S_{u,i}$
Énergie cinétique turbulente	$k$	$\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k}$	$G_k - \rho\epsilon + S_k$
Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente	$\epsilon$	$\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon}$	$C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon$

être discrétisée à l'aide d'une expansion de la série de Taylor [35]. Les équations discrétisées ont la forme suivante :

$$a_P \phi_P = \sum a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (1.21)$$

où

- $a_P$  dépend des coefficients des cellules voisines ( $a_{nb}$ ) et de  $S_P$  (voir équation (1.20));
- $\phi_P$  est la valeur de la variable d'intérêt au point de calcul ;
- $a_P$  et les  $a_{nb}$  dépendent de la taille du volume de contrôle et de  $\Gamma$  ;
- $\phi_{nb}$  représente les valeurs de la variable d'intérêt dans la cellule voisine. En deux dimensions, les valeurs de la variable d'intérêt dans les cellules voisines sont  $\phi_E$ ,  $\phi_W$ ,  $\phi_N$  et  $\phi_S$  (voir Fig. 3) ;
- $b$  dépend de  $S_C$  (voir équation (1.20)).

Ces équations linéarisées sont résolues au centroïde de chaque cellule de façon itérative. Plus de détails sur cette procédure peuvent être obtenus en consultant les références suivantes : [35, 36].

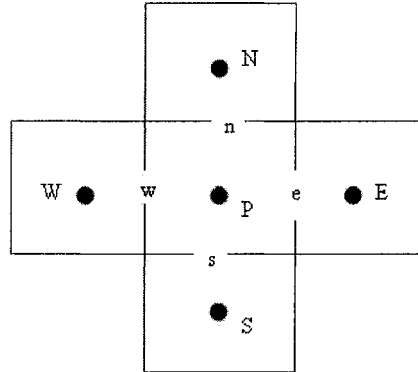


Figure 3 Position des centroïdes des cellules adjacentes au volume de contrôle

### 1.6.2.3 Schéma d'interpolation

Il est nécessaire d'utiliser un schéma d'interpolation, car pour déterminer les coefficients  $a_P, a_{nb}$  et  $b$ , la variable d'intérêt  $\phi$  doit être connue pour chaque face du volume de contrôle. En d'autres mots, le schéma d'interpolation permet de trouver  $\phi_e, \phi_w, \phi_n$  et  $\phi_s$  à partir de  $\phi_E, \phi_W, \phi_N, \phi_S, \phi_P$  et des dimensions du volume de contrôle.

FLUENT 6.2 permet l'utilisation de plusieurs schémas d'interpolation dont *First order upwind*, *Second order upwind*, *Power law*, *QUICK* et *Third order MUSCL*. Le schéma d'interpolation choisi pour les calculs est le schéma *QUICK*, car il présente l'avantage d'être très précis pour des maillages structurés. Il est à noter que les résultats des calculs effectués avec les autres schémas d'interpolation ne présentaient pas de différence significative lorsque comparés avec les résultats du schéma *QUICK*. Le lecteur intéressé peut retrouver plus de détails concernant le schéma d'interpolation *QUICK* à la référence [36].

### 1.6.2.4 Corrélation entre la vitesse et la pression

Dans la Section 1.6.2.2, l'équation (1.19) représente la forme générale des équations de conservation. Dans le cas de l'équation de conservation de la quantité de mouvement, le gradient de la pression est introduit comme un terme de source ( $S$ ) tel que présenté dans le Tableau III. Le problème associé à cette pratique est que le gradient de pression est inconnu lors de la définition du problème et qu'il n'existe pas d'équation donnant ex-

plicitement le gradient de pression en fonction de la vitesse. Par contre, la pression est indirectement spécifiée par l'équation de continuité. Lorsqu'un champ de pression correct est introduit dans l'équation de conservation de la quantité de mouvement, le champ de vitesse qui en résulte satisfait l'équation de continuité. Les algorithmes de la famille *SIMPLE* (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) permettent ce traitement de façon itérative. Les algorithmes de la famille *SIMPLE* sont présentés de façon détaillée dans le livre de Patankar [35]. FLUENT 6.2 propose deux algorithmes de la famille *SIMPLE* : *SIMPLE* et *SIMPLEC* (*SIMPLE-Consistent*). Dans ce mémoire, l'algorithme *SIMPLEC* a été choisi, car il permet une convergence plus rapide que son homologue *SIMPLE*.

#### 1.6.2.5 Résolution du système d'équations discrétisées

Le logiciel FLUENT 6.2 propose deux approches distinctes pour solutionner le système d'équations discrètes (1.21) : une approche séquentielle et une approche couplée. Par approche séquentielle on entend que les équations discrétisées sont résolues les une après les autres, alors que l'approche couplée signifie que les équations sont résolues simultanément [36]. L'approche séquentielle a été choisie parce qu'elle a été utilisée avec succès par d'autres chercheurs [33, 34]. Les étapes de la résolution séquentielle sont schématisées à la Fig. 4 [36]. Afin de déterminer si la convergence a été atteinte, il est nécessaire de définir un résidu normalisé :

$$R_\phi = \frac{\sum_{Domaine} [\sum a_{nb}\phi_{nb} + b - a_P\phi_P]}{\sum_{Domaine} [a_P\phi_P]} \quad (1.22)$$

Il est intéressant de noter que si  $R_\phi=0$  est substitué dans l'équation (1.22), l'équation (1.21) est satisfaite. Dans un tel cas, la solution est complètement convergée. Puisque les ordinateurs n'ont pas une précision infinie, de tels cas ne se produisent jamais. Par contre, une solution est convergée lorsque la valeur du résidu normalisé cesse de diminuer même si le nombre d'itération augmente. Les simulations effectuées ont permis d'obtenir des résidus normalisés aussi faibles que  $R_\phi = 10^{-14}$ . Il est à noter que la double précision a été utilisée pour tous les calculs.



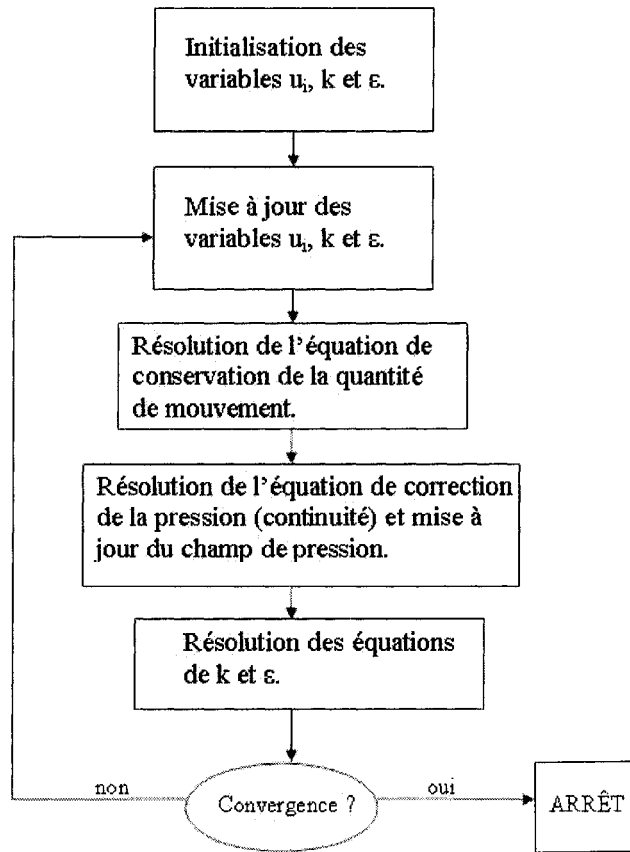


Figure 4 Étapes de la résolution séquentielle des équations linéarisées

#### 1.6.2.6 Modélisation de la forêt

Pour modéliser la forêt dans les modèles CFD, on utilise souvent une analogie entre la forêt et un milieu poreux. D'un point de vue aérodynamique, la forêt s'apparente grandement à un milieu poreux de par la perte de pression qu'elle engendre. Cette perte de pression peut être définie par la somme de deux termes : le terme des pertes visqueuses et le terme des pertes inertielles [36] :

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = - \left( \frac{\mu}{\alpha} u_i + \beta \rho u_i |u| \right) \quad (1.23)$$

où

- $\alpha$  est la perméabilité ;

- $\beta$  est la passabilité ou le coefficient inertiel ;
- $\rho$  est la densité de l'air ;
- $|u|$  est le module de la vitesse ;
- $u_i$  est la vitesse dans la direction  $i$ .

Dans le cas d'un écoulement atmosphérique, les pertes visqueuses sont négligeables par rapport aux pertes inertielles ( $\rho \gg \mu$ ). Il est donc possible de simplifier l'équation (1.23) comme suit :

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = -\beta \rho u_i |u| \quad (1.24)$$

Lors de la modélisation de la forêt comme milieu poreux, le coefficient inertiel ( $\beta$ ) peut être défini comme il suit [12, 20, 24, 37, 38, 39] :

$$\beta = C_D \alpha \quad (1.25)$$

$C_D$  est le coefficient de traînée et  $\alpha$  est la densité de surface foliaire de la forêt. Le gradient de pression peut donc s'écrire comme suit :

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = -\rho C_D \alpha u_i |u| \quad (1.26)$$

Dans la littérature, plusieurs approches différentes ont été utilisées afin d'évaluer la densité de surface foliaire ( $\alpha$ ) et le coefficient de traînée ( $C_D$ ). Pinard [12] a comparé l'utilisation d'un  $C_D$  variable en hauteur avec l'utilisation d'un  $C_D$  constant pour une forêt de pins de 14 m de hauteur. Il concluait que l'utilisation d'un  $C_D$  constant égal à 0.2 permettait d'obtenir les meilleurs résultats. Katul [24] a fait varier  $C_D$  de 0.1 à 0.35 et a comparé les résultats avec ceux obtenus par des mesures expérimentales pour la même forêt que Pinard [12], soit une forêt de pins de 14 m de hauteur. Il en a conclu, lui aussi, que  $C_D = 0.2$  était le meilleur choix. Amiro [20] a utilisé  $C_D = 0.15$  pour trois types de forêt : pins, épinettes et trembles. Il est à noter que l'évaluation de  $C_D$  implique une très grande incertitude et qu'il est très difficile de le prédire de façon exacte pour une forêt donnée. Une étude sur la dépendance en vitesse de  $C_D$  a été effectuée par Marcolla et al. [39]. Le coefficient de traînée moyen d'une forêt composée de conifères a été évalué pour des vitesses de vent variant de 0 à 6.19 m/s. Les valeurs de  $C_D$  trouvées varient entre 0.25 à basse vitesse et

0.15 à plus haute vitesse. Ceci corrobore les dire de Pinard [12], et ceux de Katul [24], qui utilisent un  $C_D$  moyen de 0.2. Finalement, Katul et al. [38] ont proposé des valeurs de  $C_D$  variant entre 0.15 et 0.3 pour 8 types de végétation. La densité de surface foliaire ( $\alpha$ ) est une mesure de la densité du feuillage de la forêt. Les mesures de  $\alpha$  peuvent être obtenues par méthodes destructives ou à l'aide d'instruments tels que le '*LICOR LAI 2000 plant canopy analyzers*' [24, 37]. L'étude de Katul et al. [38] propose un excellent résumé des différents profils de densité de surface foliaire pour plusieurs types de végétation.

### 1.6.2.7 Modélisation de la turbulence

Plusieurs modèles peuvent être utilisés pour modéliser la turbulence au-dessus et à l'intérieur d'une forêt. Les différents modèles sont présentés par ordre croissant de complexité, et donc d'exigence en terme de ressources informatiques. Les modèles d'ordre un et d'ordre un et demi reposent sur l'hypothèse de Boussinesq. L'hypothèse de Boussinesq assume que la turbulence est isotrope, ce qui n'est pas le cas pour la couche de surface atmosphérique. Quant aux modèles d'ordre deux, d'ordre trois, et aux modèles de simulation des grands tourbillons (large eddy simulation ou LES), ils ne reposent pas sur l'hypothèse de Boussinesq. Ils permettent donc de tenir compte de l'anisotropie de la turbulence atmosphérique.

Les **modèles d'ordre un** utilisent seulement une longueur de mélange et un gradient de vitesse pour représenter la viscosité tourbillonnaire. Ils sont donc conceptuellement très simples et donnent de bons résultats si la longueur caractéristique est évaluée correctement. Certaines études, dont Li et al. [40], proposent une longueur de mélange variable en altitude. Cette longueur de mélange semble donner de bons résultats, mais ne semble pas adaptée à un changement brusque de rugosité, comme une transition champs/forêt ou forêt/champs.

Les **modèles d'ordre un et demi à une équation** sont à mi-chemin entre les modèles d'ordre un et les modèles d'ordre un et demi à deux équations puisqu'ils utilisent l'équation de l'énergie cinétique turbulente ( $k$ ), et une longueur caractéristique afin de déterminer les flux turbulents. L'avantage des modèles à une équation est qu'ils sont légèrement plus précis que les modèles algébriques. Par contre, ils requièrent plus de ressource informatique que ces derniers et nécessitent l'évaluation empirique d'une longueur de mélange.

Pinard [12], Poggi et al. [41], Katul et al. [38], et Chantelot et al. [42] ont proposé un modèle d'ordre un et demi à une équation qui semble donner d'excellents résultats pour la modélisation de l'écoulement pleinement développé. Par contre, son aptitude à simuler une couche de surface qui n'est pas pleinement développée reste à démontrer.

Les modèles algébriques et les modèles à une équation ont en commun le problème de devoir référer à une longueur de mélange. L'évaluation de cette longueur est très empirique et il est nécessaire de connaître les caractéristiques de l'écoulement afin de l'évaluer correctement. Comme solution à ce problème, on utilise un **modèles d'ordre un et demi à deux équations** comme le très populaire modèle  $k - \epsilon$ . Le modèle  $k - \epsilon$  utilise l'équation de l'énergie cinétique turbulente ( $k$ ) et l'équation du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ( $\epsilon$ ) pour déterminer la viscosité tourbillonnaire. L'inconvénient de ce type de modèle, par rapport aux modèles d'ordre un, est que leur solution numérique est plus exigeante en terme de ressource informatique. Svensson et Häggkvist [21], Kobayashi et al. [43], Castro et al. [44] et Liang et al. [45] ont proposé un modèle  $k - \epsilon$  modifié pour représenter l'écoulement turbulent dans la forêt. Ce modèle propose l'ajout de termes de source aux équations standards de  $k$  et  $\epsilon$ . En 1996, Liu et al. [25] ont proposé pour la première fois la forme aujourd'hui généralement acceptée des termes sources de  $k$  et  $\epsilon$ . Par la suite, en 2003, Sanz [46] a utilisé la solution analytique de la relation de Kolmogorov afin d'évaluer les constantes du modèle  $k - \epsilon$  modifié. Finalement, les modèles d'ordre un et demi à deux équations sont très populaires, car ils donnent généralement de bons résultats tout en requérant un temps de calcul raisonnable.

Finalement, d'autres auteurs ont utilisé des **modèles d'ordre deux et d'ordre trois** [24, 47, 48], ou des **modèles de simulation des grands tourbillons (LES)** [49, 50, 51, 52, 53]. Ces modèles sont intéressants, car ils permettent de modéliser les flux turbulents, et donc de tenir compte de l'anisotropie de la turbulence atmosphérique. Par contre, l'inconvénient majeur de ces modèles c'est qu'ils exigent d'énormes ressources informatiques pour arriver à un temps de calcul raisonnable.

## CHAPITRE 2

### ÉCOULEMENT PLEINEMENT DÉVELOPPÉ

Cet article a été soumis pour publication au journal *Wind Energy*. L'article complet et les résultats détaillés sont disponibles à l'Annexe 1. Voici un résumé de l'article.

Le premier objectif de l'article était de développer un modèle CFD unidimensionnel aux fins de simuler l'écoulement turbulent pleinement développé au-dessus et à l'intérieur d'une forêt, et de valider ce modèle à l'aide de mesures expérimentales provenant de trois forêts [20] : une forêt d'épinettes noires, une forêt de pins et une forêt de trembles. Le second objectif consistait à comparer deux conditions à la frontière du sol et de déterminer la densité de forêt minimale à partir de laquelle la rugosité du sol de la forêt peut être négligée.

#### 2.1 Modèle mathématique

Pour l'obtention des équations simplifiées représentant l'écoulement pleinement développé au-dessus et à l'intérieur d'une forêt, certaines hypothèses étaient de mise : écoulement incompressible, stabilité thermique neutre, forêt horizontalement homogène, terrain plat et force de Coriolis négligeable. Les axes des coordonnées ont été choisis de sorte que l'axe des  $z$  est perpendiculaire au sol et qu'une augmentation de  $z$  est représentative d'une augmentation d'altitude.

L'équation de la conservation de la quantité de mouvement peut s'écrire comme il suit [38] :

$$0 = -\frac{dp}{dz} + \mu \frac{d^2 u}{dz^2} - \frac{d}{dz} (\rho \overline{u'w'}) + S_u \quad (2.1)$$

$$S_u = -\rho C_D \alpha u^2 \quad (2.2)$$

Suivant l'hypothèse de Boussinesq, le flux turbulent de la quantité de mouvement peut s'écrire comme il suit :

$$-\rho \overline{u'w'} = \mu_t \frac{du}{dz} \quad (2.3)$$

La viscosité turbulente ( $\mu_t$ ) a été définie à partir de l'énergie cinétique turbulente ( $k$ ), du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ( $\epsilon$ ), de la densité de l'air ( $\rho$ ) et d'une constante  $C_\mu$  :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.4)$$

Les équations de transport pour  $k$  et  $\epsilon$  ont été obtenues en modifiant les équations originales de Jones et Launder [54]. Des termes de source ( $S_k$  et  $S_\epsilon$ ) ont été ajoutés aux équations afin de représenter la génération de turbulence créée par la forêt [38] :

$$0 = \frac{d}{dz} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{dk}{dz} \right] + \mu_t \left( \frac{du}{dz} \right)^2 - \rho \epsilon + S_k \quad (2.5)$$

$$0 = \frac{d}{dz} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{d\epsilon}{dz} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \mu_t \left( \frac{du}{dz} \right)^2 - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (2.6)$$

$$S_k = \rho C_D \alpha [\beta_p u^3 - \beta_d k u] \quad (2.7)$$

$$S_\epsilon = \rho C_D \alpha \frac{\epsilon}{k} [C_{\epsilon 4} \beta_p u^3 - C_{\epsilon 5} \beta_d k u] \quad (2.8)$$

$C_{\epsilon 4}$ ,  $C_{\epsilon 5}$ ,  $\beta_p$  and  $\beta_d$  sont des constantes du modèle. Afin d'adapter le modèle  $k - \epsilon$  à la modélisation de la turbulence de la couche de surface atmosphérique, il était nécessaire de modifier les constantes originales de Jones et Launder [54] (Tableau IV). Les nouvelles constantes sont présentées dans le Tableau V [38].

Tableau IV

Constantes originales du modèle  $k - \epsilon$ 

$C_\mu$	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

Tableau V

Constantes du modèle  $k - \epsilon$  modifié

$C_\mu$	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$	$C_{\epsilon 4}$	$C_{\epsilon 5}$	$\beta_p$	$\beta_d$
0.03	1.44	1.92	1.0	2.12	0.78	0.78	1.0	5.03

## 2.2 Méthode numérique

Le modèle mathématique présenté à la Section 2.1 peut être résolu si le logiciel FLUENT 6.2 est utilisé. Une explication détaillée du fonctionnement du logiciel FLUENT 6.2 est présentée à la Section 1.6.2. Puisque seul la solution pleinement développée était considérée, un scalaire défini par l'utilisateur (UDS) a été utilisé pour représenter la vitesse du vent ( $u$ ). En utilisant cette technique, seulement trois équations ont été résolues : l'équation pour le UDS (Éq. 2.1), l'équation de  $k$  et l'équation de  $\epsilon$ .

### 2.2.1 Conditions aux frontières

Aux **frontières latérales**, une condition de symétrie a été utilisée.

Au **sol**, deux conditions à la frontière différentes ont été utilisées. La première est une condition de cisaillement nul [38], et la deuxième est une condition de cisaillement permettant de tenir compte de la rugosité du sol de la forêt.

Au **sommet**, une condition à la frontière définissant une vitesse de friction constante au sommet du domaine a été utilisée [55].

### 2.3 Résultats

Pour valider la méthode proposée, on a utilisé les mesures expérimentales de Amiro [20]. Amiro [20] a obtenu des mesures de vitesse et de turbulence pour trois forêts types d'une forêt boréale : une forêt d'épinettes noires, une forêt de pins et une forêt de trembles. Les résultats obtenus indiquent que la méthode proposée permet de simuler de façon précise la vitesse et la vitesse de friction, mais sous-estime l'énergie cinétique turbulente dans la partie inférieure de la forêt. De plus, les deux conditions à la frontière du sol ont été comparées pour différentes densités forestières. Les résultats indiquent que la rugosité du sol de la forêt peut être négligée si la densité de forêt est supérieure à  $C_D LAI > 0.6$ . En dessous de 0.6, il ne serait pas approprié de parler de cisaillement nul pour le sol de la forêt.



## CHAPITRE 3

### ÉCOULEMENT EN BORDURE D'UNE FORÊT

Cet article a été soumis pour publication au journal *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. L'article complet et les résultats détaillés sont disponibles à l'Annexe 2. Ce qui suit est un résumé de l'article.

Le premier objectif de l'article était de développer un modèle CFD bidimensionnel pour simuler l'écoulement près du bord d'une forêt semi-infinie, et de le valider à l'aide de mesures expérimentales obtenues par trois auteurs différents [1, 2, 3]. Le deuxième objectif était d'utiliser un modèle CFD unidimensionnel afin d'obtenir une solution de l'écoulement pleinement développé au-dessus et à l'intérieur de la forêt, et d'utiliser les résultats comme condition à la frontière d'entrée, pour la modélisation de l'écoulement sortant d'une forêt semi-infinie.

#### 3.1 Modèle mathématique

Un modèle CFD a été utilisé pour simuler l'écoulement en bordure d'une forêt. Ce modèle repose sur quelques hypothèses simplificatrices :

- Écoulement incompressible ;
- Écoulement stationnaire ;
- Atmosphère neutre ;
- Force de Coriolis négligeable ;
- Forêt horizontalement homogène.

Les équations représentant la physique de l'écoulement sont les équations de conservation de la masse (3.1) et de conservation de la quantité de mouvement (3.2) dont les moyennes ont été établies selon la procédure de Reynolds. Pour représenter l'absorption d'une partie de la quantité de mouvement par la forêt, un terme de source ( $S_{u,i}$ ) a été ajouté [38]. Il est à noter qu'à l'extérieur de la forêt, le terme de source ( $S_{u,i}$ ) est nul.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u'_i u'_j}) + S_{u,i} \quad (3.2)$$

$$S_{u,i} = -\rho C_D \alpha |u| u_i \quad (3.3)$$

où  $S_{u,i}$  est la force de traînée exercée par la forêt dans la direction  $i$ .

Le modèle de turbulence proposé est un modèle  $k - \epsilon$  modifié, où la génération et la dissipation de la turbulence par la forêt est représentée par des termes de source dans les équations de  $k$  et  $\epsilon$ . L'efficacité de ce modèle à représenter les flux turbulents au-dessus et à l'intérieur d'une forêt a été démontrée par plusieurs auteurs [20, 21, 25, 38, 43, 46]. Selon l'hypothèse de Boussinesq, les flux turbulents peuvent être évalués comme il suit :

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.4)$$

Le modèle  $k - \epsilon$  utilise l'équation de l'énergie cinétique turbulente ( $k$ ) et l'équation du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ( $\epsilon$ ) en vue de déterminer la viscosité tourbillonnaire ( $\mu_t$ ) :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon + S_k \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \overline{u_i} \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (3.7)$$

$$G_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3.8)$$

$$S_k = \rho C_D \alpha [\beta_p |u|^3 - \beta_d k |u|] \quad (3.9)$$

$$S_\epsilon = \rho C_D \alpha \frac{\epsilon}{k} [C_{\epsilon 4} \beta_p |u|^3 - C_{\epsilon 5} \beta_d k |u|] \quad (3.10)$$

où  $C_{\epsilon 4}$ ,  $C_{\epsilon 5}$ ,  $\beta_p$  et  $\beta_d$  sont des constantes du modèle. Les constantes utilisées dans le modèle de turbulence sont présentées dans le Tableau V du Chapitre 2.

### 3.2 Méthode numérique

Le logiciel commercial FLUENT 6.2 a servi à résoudre les équations présentées à la Section 3.1. Une explication du fonctionnement du logiciel FLUENT 6.2 est présentée à la Section 1.6.2.

#### 3.2.1 Conditions aux frontières (écoulement entrant dans la forêt)

À l'**entrée et au sommet** du domaine, le profil logarithmique [9] et les équations représentant la turbulence sur un terrain plat [10] ont été imposés (voir Eqs. (1.9), (1.10) et (1.11)).

À la **sortie** du domaine, la condition frontière de sortie telle que décrite par Patankar [35] a été utilisée. Cette condition définit un flux de diffusion nul à la sortie et utilise une correction globale afin d'assurer la conservation de la masse.

Au **sol à l'extérieur de la forêt**, une condition de cisaillement a été utilisée. Pour ce faire, l'approche itérative de Richards et Hoxey [56] a été suivie. Cette approche définit la vitesse, l'énergie cinétique turbulente et le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente près du sol, d'après une vitesse de friction locale calculée à partir de la hauteur de rugosité du sol ( $z_o$ ). Selon cette technique, le domaine de calcul commence à une hauteur égale à la hauteur de rugosité du sol ( $z_o$ ).

Au **sol dans la forêt**, une fonction de transition originale a été utilisée. Cette fonction permet de faire la transition entre une condition de cisaillement en amont de la forêt et une condition de cisaillement nul loin à l'intérieur de la forêt.

#### 3.2.2 Conditions aux frontières (écoulement sortant de la forêt)

À la **sortie** du domaine, au **sol à l'extérieur de la forêt** et au **sol à l'intérieur de la forêt**, les conditions aux frontières spécifiées précédemment (Section 3.2.1) ont été utilisées.

À l'**entrée et au sommet** du domaine, la solution de l'écoulement pleinement développé a été imposée. Par le passé, plusieurs auteurs [10, 11, 12, 20] ont proposé des solutions empiriques en vue de définir l'écoulement pleinement développé au-dessus et à l'intérieur

de la forêt (voir Sections 1.3 et 1.4). Le problème, avec ces équations, c'est qu'elles ne sont pas des solutions analytiques du modèle et que leur précision dépend grandement de paramètres difficiles à évaluer. C'est donc pour ces raisons qu'il était nécessaire d'obtenir une solution numérique de l'écoulement pleinement développé pour définir la condition à la frontière d'entrée du domaine. La méthode utilisée pour la solution du problème pleinement développé a été présentée au Chapitre 2.

### **3.3 Résultats**

Aux fins de valider la méthode proposée, on a utilisé les mesures expérimentales obtenues par trois auteurs [1, 2, 3]. Les résultats expérimentaux de Irvine et al. [1] ont été utilisés pour valider le modèle pour l'écoulement entrant à l'intérieur de la forêt, tandis que les résultats expérimentaux de Raynor [2] et de Gash [3] ont permis de valider le modèle pour l'écoulement sortant de la forêt. Les résultats obtenus démontrent que la méthode proposée permet de simuler de façon précise la vitesse du vent près du bord d'une forêt pour un écoulement entrant dans la forêt, aussi bien que pour un écoulement sortant de la forêt. Par contre, la méthode proposée semble sous-estimer l'intensité de turbulence dans la partie inférieure de la forêt. Néanmoins, les résultats obtenus sont très encourageants et motivent la poursuite de la recherche.

## CHAPITRE 4

### UTILISATION DE WASP POUR L'ÉCOULEMENT EN BORDURE D'UNE FORÊT

Cet article sera présenté à la *conférence européenne sur l'énergie éolienne*, qui aura lieu à Milan en Italie du 7 au 10 mai 2007, et sera inclus dans le compte rendu de la conférence. L'article et les résultats détaillés sont disponibles à l'Annexe 3. Voici un résumé de l'article.

Le premier objectif de cet article était d'évaluer l'influence de la position de la station météorologique sur les prédictions de l'écoulement, obtenues par WASP. Le deuxième objectif était de comparer les prédictions de WASP à des mesures expérimentales à basse altitude et à des prédictions numériques CFD à plus haute altitude, pour l'écoulement entrant et l'écoulement sortant d'une forêt.

#### 4.1 Mesures expérimentales

Les mesures expérimentales utilisées dans cet article ont été obtenues par deux auteurs différents : Irvine et al. [1] et Raynor [2]. L'étude de Irvine et al. [1] a été utilisée en vue d'obtenir des mesures expérimentales pour l'écoulement entrant à l'intérieur de la forêt, tandis que l'étude de Raynor [2] a été utilisée afin d'obtenir des mesures expérimentales pour l'écoulement sortant de la forêt.

#### 4.2 Simulations CFD

Étant donnée que les mesures expérimentales disponibles dans la littérature [1, 2] ne présentaient pas de mesures expérimentales pour une hauteur supérieure à deux fois la hauteur de la forêt, il était nécessaire d'utiliser les prédictions à haute altitude d'un modèle CFD. Le modèle CFD utilisé est le même modèle que celui présenté au Chapitre 3 (Sections 3.1 et 3.2).

### 4.3 WAsP

WAsP est un logiciel développé par le laboratoire national Risoe du Danemark qui, au fil des années, s'est imposé comme l'outil type de caractérisation de la ressource éolienne. Une description détaillée du fonctionnement du logiciel WAsP a été présentée à la Section 1.6.1.1. Afin de représenter la forêt, l'approche de Dellwik et al. [31] a été utilisée (voir Section 1.6.1.2). Dans WAsP, la position de la station météorologique a été variée pour l'analyse de l'influence de ce paramètre sur les prédictions de WAsP. Pour chaque direction, écoulement entrant dans la forêt et écoulement sortant de la forêt, neuf positions de la station météorologique ont été analysées.

### 4.4 Résultats

Les résultats obtenus démontrent que les prédictions de WAsP sont en corrélation étroite avec la position de la station météorologique. Pour éviter de sous-estimer la vitesse à une hauteur typique du moyeu d'une éolienne ( $\approx 80$  m), la station météorologique devrait être située à l'extérieur de la forêt ou au-dessus de la forêt à une hauteur supérieure à cinq fois la hauteur de la forêt ( $z/h > 5$ ). Si la station météorologique au-dessus de la forêt est située à une hauteur inférieure à cinq fois la hauteur de la forêt, il y a risque de sous-estimer la vitesse de 20%.

## CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'objectif principal de ce travail consistait à développer un modèle qui permette de simuler l'écoulement atmosphérique à l'intérieur et au-dessus d'une forêt. Pour ce faire, un modèle de simulation numérique CFD utilisant une analogie entre la forêt et un milieu poreux, et un modèle de turbulence  $k - \epsilon$  modifié, ont été proposés. La méthode proposée a été appliquée à deux types d'écoulement : l'écoulement pleinement développé au-dessus et à l'intérieur d'une forêt, et l'écoulement en bordure d'une forêt. Cette méthode a été validée à l'aide de mesures expérimentales obtenues par d'autres auteurs [1, 2, 3, 20]. Les résultats obtenus ont démontré que la méthode proposée permet de simuler de façon très précise la vitesse du vent et la turbulence au-dessus de la forêt. À l'intérieur de la forêt, la méthode proposée semble sous-estimer la turbulence. De plus, les résultats obtenus lors de la simulation de l'écoulement pleinement développé indiquent que la rugosité du sol de la forêt peut être négligée si la densité de la forêt est supérieure à  $C_D \text{LAI} > 0.6$ . Ceci implique que pour une forêt caractérisée par  $C_D \text{LAI} > 0.6$ , une condition de cisaillement nul peut être utilisée pour représenter le sol. La méthode proposée a aussi servi à déterminer l'influence de la position de la station météorologique dans WAsP. Les résultats obtenus indiquent que pour éviter que les prédictions de WAsP sous-estiment la vitesse, la station météorologique devrait être située à l'extérieur de la forêt, ou au-dessus de la forêt à une hauteur supérieure à cinq fois la hauteur de la forêt.

En résumé, les principaux avantages de la méthode proposée, par rapport aux modèles utilisés présentement dans l'industrie de l'énergie éolienne [5, 6, 7], sont sa capacité à simuler adéquatement l'écoulement à l'intérieur et au-dessus de la forêt, sa capacité à simuler la turbulence, et sa capacité à définir de façon plus détaillée les caractéristiques aérodynamiques de la forêt.

Finalement, à la lumière des résultats obtenus lors de ce travail, il est possible d'émettre les suggestions suivantes relatives aux développements futurs de la méthode proposée :

- Analyser l'impact des variations saisonnières de la densité de feuillage sur l'écoulement dans la couche de surface atmosphérique ;
- Adapter la méthode proposée aux écoulements tridimensionnels ;

- Intégrer la méthode proposée aux modèles de simulation numérique CFD sur terrain complexe [33] ;
- Intégrer les effets de la stabilité thermique à la méthode proposée [34].



## **ANNEXE 1**

### **NUMERICAL STUDY OF FULLY DEVELOPED TURBULENT FLOW WITHIN AND ABOVE A DENSE FOREST**

Cet article a été soumis pour publication au journal *Wind Energy*.

## 1.1 Abstract

Fully developed wind flow predictions within and above a dense forest were obtained using a Computational Fluid Dynamics (CFD) model. The model used a porous media analogy and a modified  $k - \epsilon$  turbulence model where source terms were added to the momentum and turbulence equations. The mathematical model was solved using the software FLUENT 6.2. Experimental measurements from a black spruce forest, a jack pine forest and an aspen forest were used to validate the model. Two different ground boundary conditions were proposed: a full slip boundary condition and a boundary condition that takes into account the forest ground roughness. Using those two boundary conditions, the accuracy of the proposed method was tested for forests with low foliage density. A sensitivity analysis was also performed on two important parameters: the drag coefficient and the leaf area density distribution. Results indicate that the proposed method simulated well the characteristics of wind flow within and above a forest. Results also indicate that, to obtain accurate results above the forest, it is necessary to take into account the forest ground roughness for forests with  $C_D \text{LAI} < 0.6$ .

## 1.2 Introduction

In recent years, more and more wind farms are being installed on forested sites where the forest has a significant impact on the power production and creates challenges in assessing the wind resource. Forested sites significantly reduce wind velocity and increase turbulence. A popular approach to represent the effect of the forest on the wind flow is to use a displacement height ( $d$ ) and a roughness length ( $z_o$ ) [1, 2].  $d$  and  $z_o$  can be used in either logarithmic equations [3] or in software packages such as WAsP [4]. To define  $d$  and  $z_o$ , some authors [1, 5, 6] used only the forest height, while others [7, 8, 9] used the forest height and various measures of the forest density. The problems associated with these approaches are the difficulty to evaluate precisely  $d$  and  $z_o$ , and the fact that they do not take into account the turbulence.

An alternative to the  $d$ - $z_o$  approaches are Computational Fluid Dynamics (CFD) models. The advantage of these models is their ability to simulate turbulence and to take into

account more precisely the aerodynamic characteristics of the forest. To represent pressure loss and velocity reduction within the forest, the CFD models use an analogy between the forest and a porous media. In the CFD models, the pressure loss within the forest is created by a source term defined using a drag coefficient ( $C_D$ ) and a leaf area density ( $\alpha$ ) [5, 10, 11, 12, 13, 14]. To simulate turbulence, CFD models can use various models ranging from the simple first order models [15] to the more complex LES models [16, 17, 18, 19]. In the present study, a modified  $k - \epsilon$  model was used. First proposed by Jones and Launder [20], the  $k - \epsilon$  model has been modified and used to simulate atmospheric surface layer flow, above and within forests, with great success [12, 21, 22].

The first objective of this paper was to develop a one dimensional CFD model to simulate the fully developed wind flow, and to validate it using experimental measurements from three forests [13]: a black spruce forest, a jack pine forest and an aspen forest. The second objective was to compare two different ground boundary conditions and to determine the minimum forest density for which the forest ground roughness can be neglected.

### 1.3 Mathematical model

To obtain the mathematical model for fully developed wind flow over and through a forest, it was necessary to make some assumptions: incompressible flow, steady state, neutral atmosphere, horizontally homogeneous forest, flat terrain and negligible coriolis force. The assumption of negligible coriolis force was justified, since only the atmospheric surface layer was considered. All horizontal gradients were set to zero. The coordinate axis was chosen such that the  $z$  axis was perpendicular to the ground.

#### 1.3.1 Governing equation

For fully developed wind flow over and through a forest, the momentum equation can be written as follows:

$$0 = -\frac{dp}{dz} + \mu \frac{d^2 u}{dz^2} - \frac{d}{dz} (\rho \overline{u'w'}) + S_u \quad (1.1)$$

$$S_u = -\rho C_D \alpha u^2 \quad (1.2)$$

where

- $\rho$  is the air density ( $kg/m^3$ );
- $C_D$  is the drag coefficient of the forest;
- $\alpha$  is the leaf area density ( $m^2/m^3$ );
- $u$  is the wind velocity ( $m/s$ ).

$S_u$  is a source term representing the momentum absorbed within the forest [5, 10, 11, 12, 13, 14]. It is equal to zero outside the forest.

### 1.3.2 Turbulence model

To obtain the turbulent flux in Eq. (1.1) ( $\overline{u'w'}$ ), the Boussinesq hypothesis was used:

$$-\rho \overline{u'w'} = \mu_t \frac{du}{dz} \quad (1.3)$$

The turbulent viscosity ( $\mu_t$ ) was defined using the turbulent kinetic energy ( $k$ ), the turbulent kinetic energy dissipation rate ( $\epsilon$ ), the air density ( $\rho$ ) and a constant  $C_\mu$ :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (1.4)$$

The transport equations for  $k$  and  $\epsilon$  were obtained by modifying the standard  $k - \epsilon$  model of Jones and Launder [20]. Source terms ( $S_k$  and  $S_\epsilon$ ) were added to the equations to take into account the turbulence generated by the forest [12]:

$$0 = \frac{d}{dz} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{dk}{dz} \right] + \mu_t \left( \frac{du}{dz} \right)^2 - \rho \epsilon + S_k \quad (1.5)$$

$$0 = \frac{d}{dz} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{d\epsilon}{dz} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \mu_t \left( \frac{du}{dz} \right)^2 - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (1.6)$$

$$S_k = \rho C_D \alpha [\beta_p u^3 - \beta_d k u] \quad (1.7)$$

$$S_\epsilon = \rho C_D \alpha \frac{\epsilon}{k} [C_{\epsilon 4} \beta_p u^3 - C_{\epsilon 5} \beta_d k u] \quad (1.8)$$

$C_{\epsilon 4}$ ,  $C_{\epsilon 5}$ ,  $\beta_p$  and  $\beta_d$  are model constants (see Table 3). To adapt the standard  $k - \epsilon$  model to the atmospheric surface layer, the original constants of Jones and Launder [20] (Table 1) were modified. To do so, the neutral surface layer ratios of standard deviations of velocity components to friction velocity were used [6] (Table 2). From these ratios,  $C_\mu$  was determined [12]:

$$C_\mu = \frac{1}{(0.5 [(\sigma_u/u_*)^2 + (\sigma_v/u_*)^2 + (\sigma_w/u_*)^2])^2} = 0.03 \quad (1.9)$$

$\sigma_\epsilon$  was determined from Eq. (1.10) [12]:

$$\sigma_\epsilon = \frac{K^2}{\sqrt{C_\mu} (C_{\epsilon 2} - C_{\epsilon 1})} = 2.12 \quad (1.10)$$

where  $K$  is the von Karman constant ( $K=0.42$ ).

$C_\mu$	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

Table I

Original constants of the  $k - \epsilon$  turbulence model

Using  $\beta_p = 1$  [23, 24],  $\beta_d$ ,  $C_{\epsilon 4}$  and  $C_{\epsilon 5}$  were evaluated as proposed by Sanz [21]:

$$\beta_d = \sqrt{C_\mu} \left( \frac{2}{0.05} \right)^{2/3} \beta_p + \frac{3}{\sigma_k} = 5.03 \quad (1.11)$$

$$C_{\epsilon 4} = C_{\epsilon 5} = \sigma_k \left[ \frac{2}{\sigma_\epsilon} - \frac{\sqrt{C_\mu}}{6} \left( \frac{2}{0.05} \right)^{2/3} (C_{\epsilon 2} - C_{\epsilon 1}) \right] = 0.78 \quad (1.12)$$

$\sigma_u/u_*$	$\sigma_v/u_*$	$\sigma_w/u_*$
2.4	2.1	1.25

Table II

Neutral surface layer ratios of standard deviations of velocity components to friction velocity

Table 3 presents a summary of all the constants of the modified  $k - \epsilon$  turbulence model.

$C_\mu$	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$	$C_{\epsilon 4}$	$C_{\epsilon 5}$	$\beta_p$	$\beta_d$
0.03	1.44	1.92	1.0	2.12	0.78	0.78	1.0	5.03

Table III

Turbulence constants of the modified  $k - \epsilon$  turbulence model

#### 1.4 Numerical Method

To solve the momentum and the equations for  $k$  and  $\epsilon$ , the commercial software FLUENT 6.2 was used. FLUENT 6.2 uses a control-volume-based technique to convert the governing equations to algebraic equations that can be solved numerically. To accelerate convergence, the SIMPLEC pressure-velocity coupling method was used. The PRESTO pressure interpolation scheme was used because the problem involved porous media [25]. The QUICK interpolation scheme was used for all other dependent properties, since it is known to be accurate on structured grids aligned with the flow direction [25]. One advantage of using FLUENT 6.2 is that it has already demonstrated its ability to simulate atmospheric surface layer flows [26, 27]. Since only a fully developed solution was considered, a User-Defined Scalar (UDS) was used to represent the wind velocity which was perpendicular to the computational domain (see Fig. 1). Using this technique, only three equations were solved: the equation for the UDS representative of the velocity perpendicular to the computational domain, and the equations for  $k$  and  $\epsilon$ .

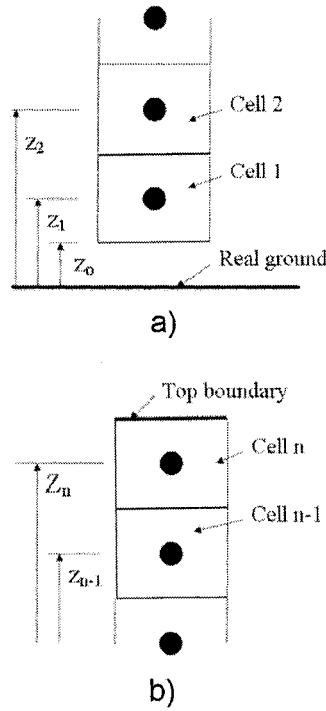


Figure 1 Cells a) near the ground boundary and b) near the top boundary

#### 1.4.1 Domain and grid

The calculation domain was 1 m wide by 800 m high, and was composed of only one column of cells. The calculation domain was divided into 192 non-uniform rectangular grids. The shortest distance between the grid points was used at the ground ( $\Delta z = 0.05$  m). Grid size increased with altitude up to  $\Delta z = 50$  m near the top of the domain. Using this calculation grid, a domain independent and grid independent solution was obtained.

#### 1.4.2 Boundary conditions

On the **side boundaries**, a symmetry condition was used.

Two different **ground boundary** conditions were considered. First, a full slip condition was used. This boundary condition assumed that the shear stress near the ground was small compared to the local drag force generated by the forest [12, 28]. The second boundary

type was a roughness boundary condition that can take into account the forest ground roughness ( $z_o$ ). More precisely, velocity and turbulence quantities at Cell 1 (see Fig. 1a) were prescribed using the logarithmic wind profile [3] and the turbulence quantities as proposed by Panofsky and Dutton [2]:

$$u_1 = \frac{u_{*,g}}{K} \ln \left( \frac{z_1}{z_o} \right) \quad (1.13)$$

$$k_1 = \frac{u_{*,g}^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (1.14)$$

$$\epsilon_1 = \frac{u_{*,g}^3}{K z_1} \quad (1.15)$$

$u_{*,g}$ , the ground friction velocity, was calculated using the approach proposed by Richards and Hoxey [29] (see Eq. (1.16)). Using this approach, the wind flow below  $z_o$  was not modeled since the computational domain had its bottom boundary at a height  $z = z_o$  (Fig. 1a).

$$u_{*,g} = \frac{u_2 K}{\ln \left( \frac{z_2}{z_o} \right)} \quad (1.16)$$

This was an iterative process since a new value of  $u_{*,g}$  was calculated at every iteration. This procedure was implemented using User-Defined Functions (UDF) in FLUENT 6.2.

At the **top boundary**, a boundary condition developed by Dalpé and Masson [30] was used. It assumed that, at the top of the domain, the wind profile followed a logarithmic profile such that the friction velocity ( $u_{*,top}$ ) was constant. This assumption was validated during the numerical simulations. At the top of the domain, the velocity ( $u_n$ ) was prescribed (see Fig. 1b). Using this velocity, the turbulent kinetic energy ( $k_n$ ) and the dissipation rate of turbulent kinetic energy ( $\epsilon_n$ ) were calculated.  $u_{*,top}$  was defined using the velocities at the centroid of the two cells adjacent to the top boundary ( $u_n$  and  $u_{n-1}$ ) (see Fig. 1b).  $u_n$  was prescribed, while  $u_{n-1}$  was the value at the centroid of Cell n-1 obtained from the previous iteration. Iterations were done until a converged value of  $u_{n-1}$  was obtained.  $u_{*,top}$  was calculated at every iteration using Eq. (1.17).



$$u_{*,top} = \frac{(u_n - u_{n-1}) K}{\ln(z_n/z_{n-1})} \quad (1.17)$$

Using  $u_{*,top}$ ,  $k_n$  and  $\epsilon_n$  were prescribed using the equations proposed by Stull [3], and Panofsky and Dutton [2]:

$$k_n = \frac{u_{*,top}^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (1.18)$$

$$\epsilon_n = \frac{u_{*,top}^3}{K z_n} \quad (1.19)$$

### 1.5 Experimental measurements

In order to validate the proposed method, experimental measurements from Amiro [13] were used. Amiro [13] obtained velocity and turbulence measurements from three natural forests typical of the boreal forest: a black spruce forest (SP), a jack pine forest (JPI) and an aspen forest (AS). The study site was located in southeastern Manitoba, Canada, about 100 km east-northeast of Winnipeg. The area was very flat with elevations varying by less than a few meters in altitude. Measurements were obtained during the day when conditions above the forest were either neutral or unstable. To ensure that measurements were representative of fully developed wind flow, the sites extended upwind of the measurement mast for 1.5 km, 0.5 km and 2 km for the SP, JPI and AS forest, respectively. For each forest, an estimate of the leaf area density ( $\alpha$ ) distributions was obtained by destructive sampling. The normalized profiles of leaf area density ( $\alpha$  multiplied by the forest height) are presented in Fig. 2. The leaf area index (LAI) was calculated using Eq. (1.20). Since no information was given about the drag coefficient ( $C_D$ ), it was assumed to be the value that gave the best agreement between the experimental measurements and the numerical simulations. The forest ground roughness ( $z_o$ ) was guessed from the forest ground description given by Amiro [13].  $z_o$  was taken to be approximately 10% the mean height of the vegetation elements on the forest ground. Table 4 presents the mean height ( $h$ ), leaf area index (LAI), assumed drag coefficient ( $C_D$ ) and assumed forest ground roughness ( $z_o$ ) for SP, JPI and AS.

$$LAI = \int_0^h \alpha dz \quad (1.20)$$

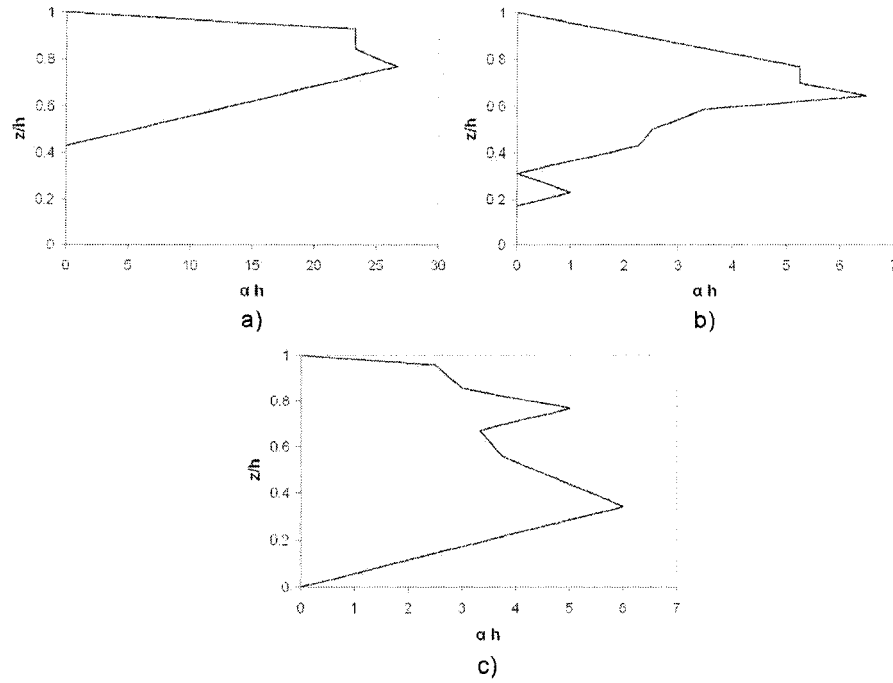


Figure 2 Leaf area density distributions for the a) black spruce forest (SP), b) jack pine forest (JPI) and c) aspen forest (AS)

	SP	JPI	AS
$h$ (m) (measured)	10	15	10
LAI (measured)	9.19	2.22	3.57
$C_D$ (assumed)	0.15	0.45	0.4
$z_o$ (m) (assumed)	0.05	0.01	0.1

Table IV

Characteristics of the black spruce forest (SP), jack pine forest (JPI) and aspen forest (AS)

## 1.6 Results

For the three forests analyzed, the velocity, friction velocity and turbulent kinetic energy (TKE) used to normalize the vertical profiles were the values at a height  $z/h=1.21$ , 1.13 and 1.31 for the SP, JPI and AS forests, respectively. In Fig. 3, the error bars represent  $\pm 1$

standard deviation. Where the error bars are missing, they are beneath the symbol. The friction velocity was calculated using Eqs. (1.21) and (1.22) for simulations and experimental measurements, respectively. The experimentally measured TKE was calculated using Eq. (1.23).

$$u^* = \sqrt{\frac{\mu_t}{\rho} \frac{du}{dz}} \quad (1.21)$$

$$u^* = \sqrt{-\overline{u'w'}} = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (1.22)$$

$$k = \frac{1}{2} (\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2) \quad (1.23)$$

### 1.6.1 Comparison with experimental measurements

Figure 3 shows the comparison between the proposed method with a full slip boundary condition, the proposed methods with a roughness boundary condition and the experimental measurements obtained by Amiro [13]. One striking result is the solution's insensitivity to the ground boundary condition. In fact, the ground boundary condition had an influence only in the lowest part of the forest. This is a characteristic of dense forests and a detailed analysis of the influence of the forest ground roughness on the solution is presented in Section 1.6.2. Wind velocity results show very good agreement with the experimental measurements. However, in order to obtain a good agreement, relatively high values of drag coefficients ( $C_D$ ) were used for the jack pine ( $C_D=0.45$ ) and aspen ( $C_D=0.4$ ) forests. These values are outside the range suggested in the literature [5, 10, 13, 14]:  $0.15 < C_D < 0.3$ . One plausible explanation for this could be a wrong  $\alpha$  distribution. To determine the  $\alpha$  distribution, Amiro [13] selected representative trees and divided their foliage into 1 m high vertical groups. As mentioned by Amiro [13], the selection of typical trees represents a possible source of error.

The friction velocity profiles obtained using the proposed method were also in good agreement with the experimental measurements for the SP and AS forests. Regarding the JPI forest, the proposed methods gave a good agreement in the upper part of the forest, but a poor agreement in the lowest part of the forest. However, in the lowest part of the forest, the standard deviations of the experimental measurements are very large, which indicates

that more experimental measurements would be needed to determine more precisely the accuracy of the proposed method. One difference between the two boundary conditions analyzed is the non zero ground friction velocity obtained using the roughness boundary condition. This was expected since the roughness boundary condition used a non zero shear stress at the ground. An interesting characteristic of the proposed method is its ability to simulate a constant friction velocity above the forest. In fact, a constant friction velocity above the forest was expected, since the friction velocity is known to be constant for a neutrally stratified surface layer [3].

Regarding the TKE results, the proposed method approximated well the shape of the TKE profiles but significantly underestimated the TKE in the lowest part of the forest. It is believed that this is a characteristic of the modified  $k-\epsilon$  turbulence model, since it was also observed by Katul et al. [12]. It is to be noted that it would have been possible to obtain a better agreement between the TKE predictions and the experimental measurements by using smaller values of  $C_D$  (see Section 1.6.3).

### 1.6.2 Applicability of the proposed method for sparse forest

Due to the lack of experimental measurements involving sparse forest in the literature, it was not possible to validate the proposed ground boundary conditions for forests with low foliage density. However, it was possible to establish general recommendations about the applicability of the two ground boundary conditions for various forest densities. In the proposed method, the forest density was defined by two parameters: the leaf area index (LAI), which is a global measure of the leaf area density ( $\alpha$ ) distribution (see Eq. (1.20)), and the drag coefficient ( $C_D$ ). As seen in Section 1.3, it is always the product of  $C_D$  and  $\alpha$  that is encountered in the momentum and turbulence source terms (Eqs. (1.2), (1.7) and (1.8)). This implies that a local measure of the forest density can be defined by the product  $C_D\alpha$ . However, if a global measure of the forest density is required the product  $C_DLAI$  would be more appropriate. As mentioned in Section 1.4.2, the ground full slip boundary condition is valid only for dense forests where the shear stress near the ground is small compared to the local drag force generated by the forest [12, 28]. In other words, for dense forests, the forest ground roughness has no influence on the wind flow above the forest. To validate this statement, four different values of  $C_DLAI$  were analyzed. A

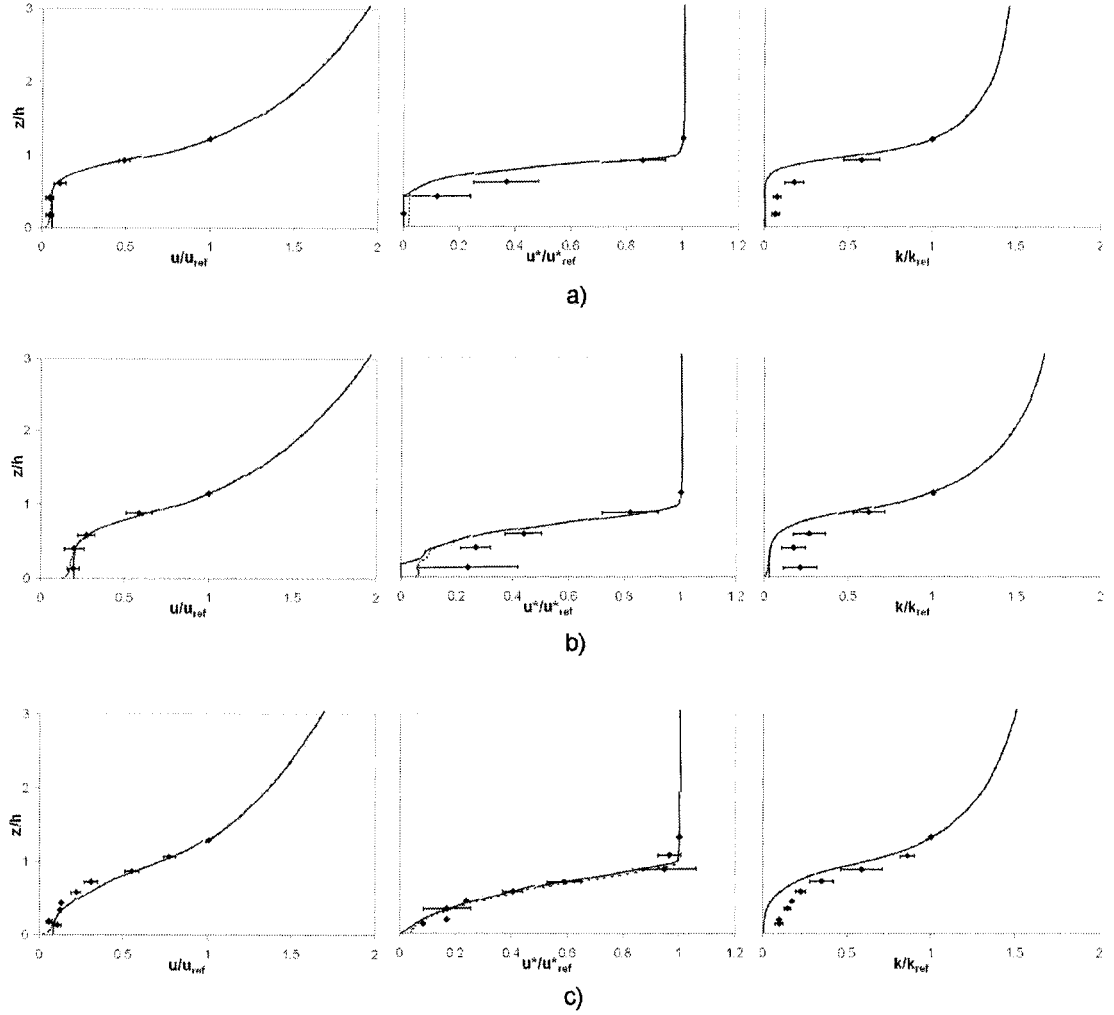


Figure 3 Comparison between the proposed method with full slip boundary condition (solid line), proposed method with roughness boundary condition (dotted line) and experimental measurements (diamond) for a) the black spruce forest (SP), b) the jack pine forest (JPI) and c) the aspen forest (AS)

generic  $\alpha$  distribution [31] was assigned (see Fig. 5a) and the forest ground roughness ( $z_o$ ) was given a value of 0.05 m, which is the average of the assumed roughness for the SP, JPI and AS forests. The results are presented in dimensionless form using a reference velocity ( $u_{ref}$ ) which was taken to be the velocity at  $z/h = 5$ . The results presented in Figure 4 were obtained by varying the parameter  $C_D LAI$  from 0.2 to 0.8. Results indicate that for the forest ground roughness to have no influence on the wind flow above the forest, the

product  $C_D \text{LAI}$  must be greater than 0.6. Below  $C_D \text{LAI}=0.6$ , the forest ground roughness can not be neglected. This implies that using a full slip ground boundary condition for a forest with  $C_D \text{LAI}$  smaller than 0.6 could result in wrong wind velocity predictions.

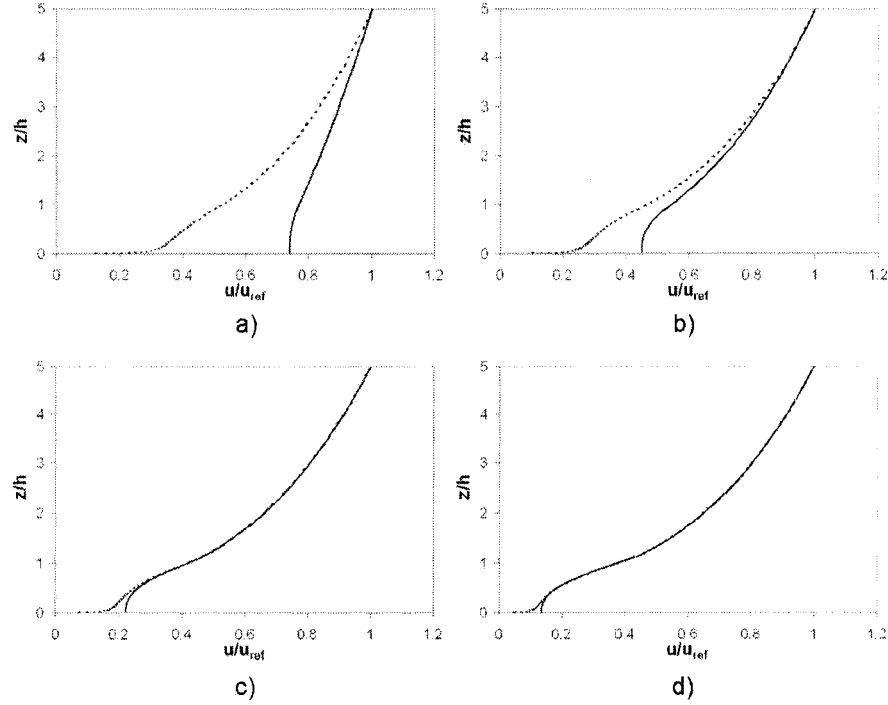


Figure 4 Ground boundary condition analysis: full slip boundary condition (solid line) and roughness boundary condition (dotted line) for a)  $C_D \text{LAI}=0.2$ , b)  $C_D \text{LAI}=0.4$ , c)  $C_D \text{LAI}=0.6$  and d)  $C_D \text{LAI}=0.8$

### 1.6.3 Drag coefficient ( $C_D$ ) sensitivity analysis

An important parameter used to define the forest was the drag coefficient ( $C_D$ ). To analyze the solution sensitivity to  $C_D$ , a generic leaf area density [31] (Fig. 5a), along with three different values of drag coefficient, were used:  $C_D=0.2$ , 0.3 and 0.4. Since all the forests analyzed in this section are characterized by  $C_D \text{LAI}>1$ , only a full slip ground boundary condition was used. To present the results, the reference values ( $u_{ref}$ ,  $u_{ref}^*$  and  $k_{ref}$ ) were the values obtained at  $z/h=5$ . From Fig. 6, it can be seen that the choice of  $C_D$  had a significant impact on the wind flow within the forest. As expected, an increase in  $C_D$

created a reduction in wind velocity, a reduction in TKE within the forest, and an increase in TKE above the forest.

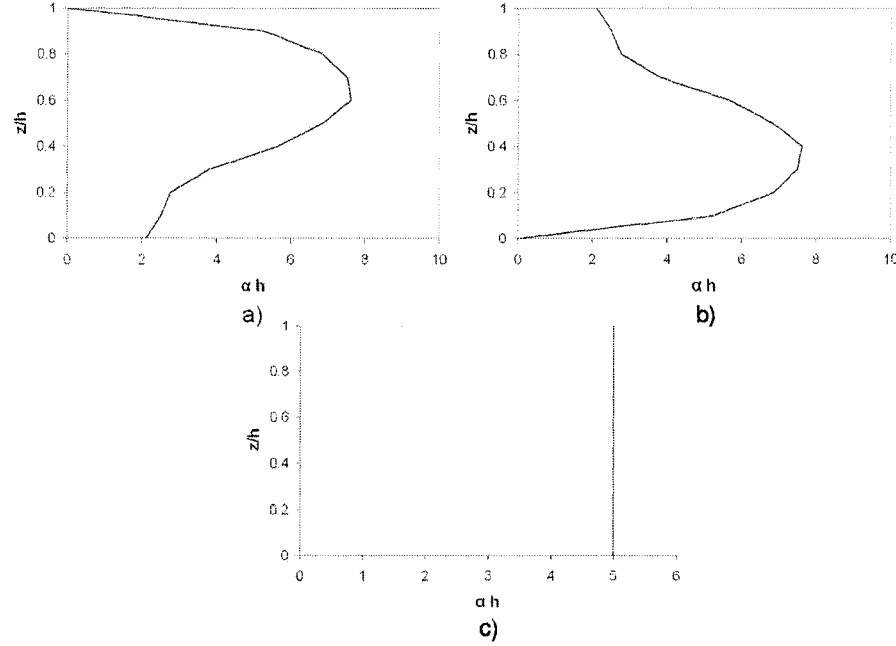


Figure 5 Three different leaf area density distributions: a)  $\alpha_1$ , b)  $\alpha_2$  and c)  $\alpha_3$

#### 1.6.4 Leaf area density ( $\alpha$ ) distribution sensitivity analysis

To analyze the solution sensitivity to the  $\alpha$  distribution,  $C_D=0.3$  was used along with the three  $\alpha$  distributions presented in Fig. 5. The three  $\alpha$  distributions presented in Fig. 5 all have a LAI of 5. To present the results, the reference value ( $u_{ref}$ ) was the wind velocity obtained at  $z/h=5$ . Fig. 7 presents the wind velocity, friction velocity and TKE profiles for the three  $\alpha$  distributions. From Fig. 7, it can be seen that the wind velocity within the forest is mainly influenced by the leaf area density in the top part of the forest. In fact, the distribution that had the largest leaf area density in the top part of the forest ( $\alpha_1$ ) created the most important velocity reduction and the most important TKE increase.

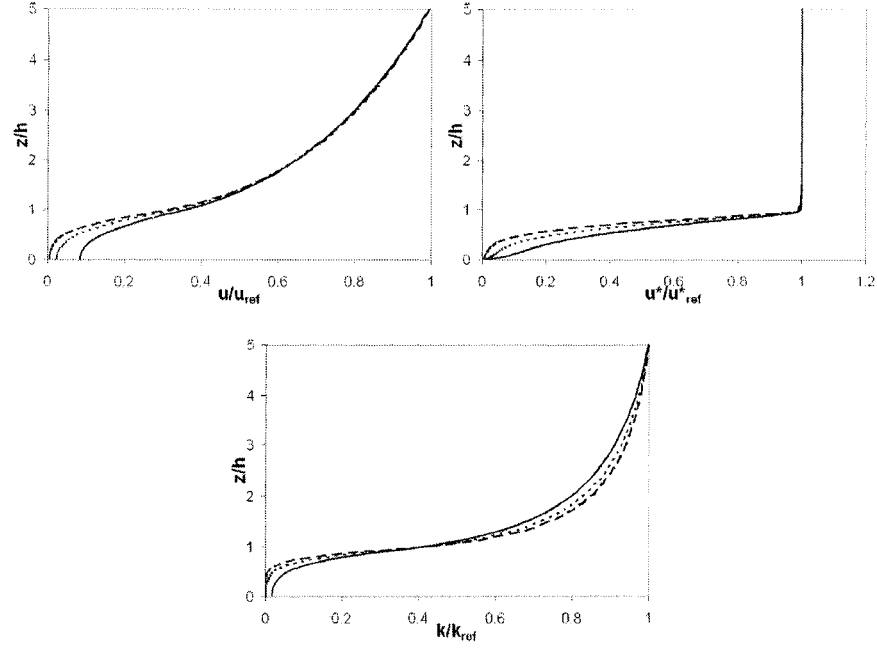


Figure 6 Drag coefficient sensitivity analysis:  $C_D=0.2$  (solid line),  $C_D=0.3$  (dotted line) and  $C_D=0.4$  (dashed line)

## 1.7 Conclusion

The purpose of this paper was to predict the fully developed wind flow over and through a forest. The wind flow was simulated using a Computational Fluid Dynamics (CFD) model with a modified  $k - \epsilon$  turbulence model. The commercial software FLUENT 6.2 was used to solve the mathematical model. The forest was represented as a porous media with a momentum source term defined by a leaf area density ( $\alpha$ ) and a drag coefficient ( $C_D$ ). At the top of the domain, the approach proposed by Dalpé and Masson [30] was used. For the ground boundary, two different boundary conditions were proposed: a full slip and an roughness boundary condition. A sensitivity analysis was performed on two important parameters: the drag coefficient and the leaf area density distribution. The numerical simulations were compared to the experimental measurements from three different forests, and the applicability of the proposed method was analyzed for sparse forests. Results indicate that the proposed method simulated well the wind velocity and friction velocity, but underestimated the TKE in the lowest part of the forest. Also, the numerical solutions



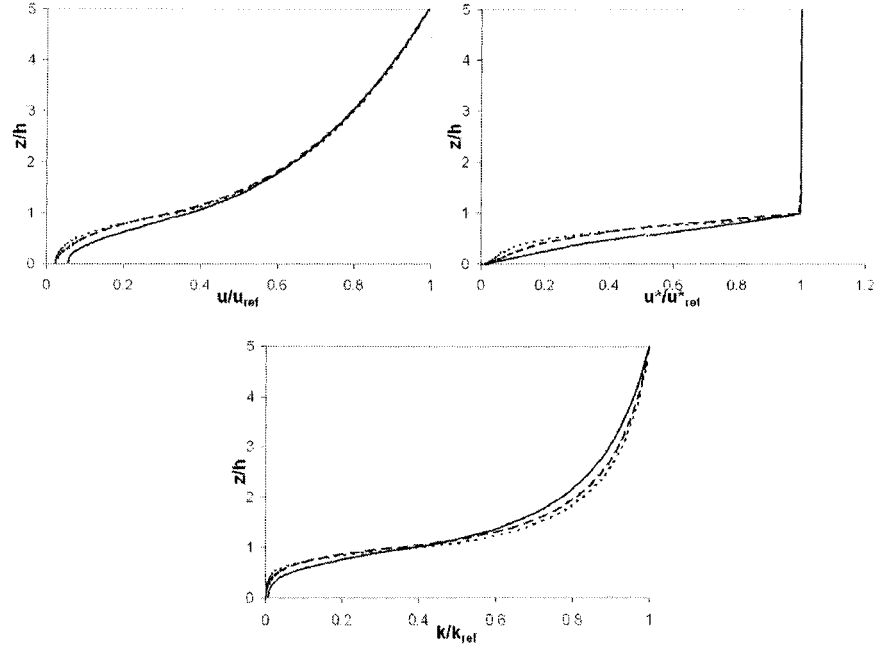


Figure 7 Leaf area density distribution sensitivity analysis:  $\alpha_1$  (dotted line),  $\alpha_2$  (solid line) and  $\alpha_3$  (dashed line)

above the forest were found independent of the forest ground roughness for forests with  $C_D \text{LAI}$  larger than 0.6. Below this value, a full slip boundary condition is not appropriate and the forest ground roughness must be accounted for.

## References

- [1] Kaimal, J. (1994), *Atmospheric boundary layer: their structure and measurement*. New-York: Oxford University Press.
- [2] Panofsky, H. and Dutton, J. (1984), *Atmospheric Turbulence*. John Wiley and Sons.
- [3] Stull, R.B. (1988), *An introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic publishers.
- [4] Dellwik, E., Landberg, L., and Jensen, N. (2006), *Wasp in the forest*. Wind Energy, vol. 9:pp. 211–218.
- [5] Pinard, J. (2000), *Numerical simulation of wind in plant canopies*. Ph.D. thesis, University of Alberta (Canada).
- [6] Garratt, J. (1992), *The Atmospheric Boundary Layer*. New York, NY: Cambridge University Press.
- [7] Raupach, M.R. (1994), *Simplified expressions for vegetation roughness length and zero-plane displacement as functions of canopy height and area index*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 71:pp. 211–216.
- [8] Massman, W.J. (1997), *An analytical one-dimensional model of momentum transfer by vegetation of arbitrary structure*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 83, 3:pp. 407–421.
- [9] Yang, R. and Friedl, M.A. (2003), *Determination of roughness lengths for heat and momentum over boreal forests*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 107, 3:pp. 581–603.
- [10] Katul, G. (1998), *An investigation of higher-order closure models for a forested canopy*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 89, 1:pp. 47–74.
- [11] Katul, G. and Wei-han, C. (1999), *Principal length scales in second-order closure models for canopy turbulence*. Journal of Applied Meteorology, vol. 38, 11:pp. 1631–1643.
- [12] Katul, G.G., Mahrt, L., Poggi, D., and Sanz, C. (2004), *One- and two-equation models for canopy turbulence*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 113, 1:pp. 81–109.
- [13] Amiro, B. (1990), *Comparison of turbulence statistics within three boreal forest canopies*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 51:pp. 99–121.
- [14] Marcolla, B., Pitacco, A., and Cescatti, A. (2003), *Canopy architecture and turbulence structure in a coniferous forest*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 108, 1:pp. 39–59.
- [15] Li, Z., Lin, J., and Miller, D. (1990), *Air flow over and through a forest edge: a steady-state numerical simulation*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 51, 1-2:pp. 179–97.

- [16] Shen, S. and Leclerc, M. (1997), *Modelling the turbulence structure in the canopy layer*. Agriculture and Forest Meteorology, vol. 87:pp. 3–25.
- [17] Su, H.B., Shaw, R.H., Paw, K.T., Moeng, C.H., and Sullivan, P.P. (1998), *Turbulent statistics of neutrally stratified flow within and above a sparse forest from large-eddy simulation and field observations*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 88, 3:pp. 363–397.
- [18] Dwyer, M.J., Patton, E.G., and Shaw, R.H. (1997), *Turbulent kinetic energy budgets from a large-eddy simulation of airflow above and within a forest canopy*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 84, 1:pp. 23–43.
- [19] Yang, B. (2003), Large eddy simulation of turbulent flow across a forest edge. Ph.d., University of California, Davis.
- [20] Jones, W.P. and Launder, B.E. (1972), *The prediction of laminarization with two-equation model of turbulence*. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 15:pp. 301–314.
- [21] Sanz, C. (2003), *A note on k-ε modelling of vegetation canopy air-flows*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 108, 1:pp. 191–197.
- [22] Liang, L., Xiaofeng, L., Borong, L., and Yingxin, Z. (2006), *Improved k-ε two-equation turbulence model for canopy flow*. Atmospheric Environment, vol. 40, 4:pp. 762–770.
- [23] Kobayashi, M., Pereira, J., and Siqueira, M. (1994), *Numerical study of the turbulent flow over and in a model forest on a 2d hill*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 53, 3:pp. 357–374.
- [24] Liu, J., Chen, J., Black, T., and Novak, M. (1996), *E-ε modelling of turbulent air flow downwind of a model forest edge*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 77, 1:pp. 21–44.
- [25] Fluent (1996), *User's guide*.
- [26] Alinot, C. and Masson, C. (2005), *k-ε model for the atmospheric boundary layer under various thermal stratifications*. Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME, vol. 127, 4:pp. 438–443.
- [27] Brodeur, P., Masson, C., and Sibuet-Watters, C. (2005), *Numerical simulation of wind distribution over very complex terrain*. In American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA-2006-1362), Reno, Nevada.
- [28] Poggi, D., Porporato, A., Ridolfi, L., Albertson, J.D., and Katul, G.G. (2004), *The effect of vegetation density on canopy sub-layer turbulence*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 111, 3:pp. 565–587.
- [29] Richards, P. and Hoxey, R. (1993), *Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k-ε turbulence model*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 46-47:pp. 145–153.

- [30] Dalpé, B. and Masson, C. (2006), *Numerical simulation of wind flow near a forest edge*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics (Submitted December 1st).
- [31] Shaw, R.H. and Schumann, U. (1992), *Large-eddy simulation of turbulent flow above and within a forest*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 61, 1:pp. 47–64.

## **ANNEXE 2**

### **NUMERICAL SIMULATION OF WIND FLOW NEAR A FOREST EDGE**

Cet article a été soumis pour publication au journal *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* le 1<sup>er</sup> décembre 2006.

## 2.1 Abstract

This paper presents a Computational Fluid Dynamics (CFD) model to simulate wind flow near a forest edge for the purpose of wind energy applications. The model uses a porous media analogy combined with a modified  $k-\epsilon$  turbulence model to simulate momentum losses and turbulence generation within the forest. The momentum losses are represented by a drag coefficient and a leaf area density. Two directions were investigated: wind flow entering and wind flow leaving the forest. A fully developed solution with original boundary conditions was used as the inlet boundary condition in the two-dimensional CFD model for wind flow leaving the forest. Original boundary conditions were also proposed for the ground boundary within the forest. The model was solved using FLUENT 6.2 and validated against field measurements from three different authors. A sensitivity analysis was performed on two key parameters: drag coefficient and leaf area density. The results obtained using the proposed method show good agreement with the wind velocity and turbulence intensity measured experimentally.

## 2.2 Introduction

Understanding the wind flow characteristics near forest edges is crucial to the wind energy industry, since wind flow predictions are essential for obtaining accurate site assessments. There have been only a limited number of experimental studies of wind flow near forest edges. Raynor [1] obtained wind velocity measurements near the transition from a coniferous forest to an open field, while Gash [2] measured wind velocity and turbulence intensity near a forest-heath interface. More recently, Irvine et al. [3] measured the wind velocity and the turbulence intensity of the wind flow entering a 7.5m high Sitka spruce forest. Regarding numerical simulations of wind flow near forest edges, Li et al. [4] applied a first-order turbulence model to simulate wind flow over and through a forest edge and compared the results to measurements made by Raynor [1]. More recently, Liu et al. [5] used a modified  $k-\epsilon$  turbulence model to simulate wind velocity and turbulent kinetic energy downwind of a model forest. These results were compared to wind tunnel mea-

surements. In the present study, a modified k- $\epsilon$  turbulence model was used because of its ability to simulate not only wind velocity, but also turbulence intensity. First proposed by Jones and Launder [6], the k- $\epsilon$  model has been adapted to the study of the atmospheric boundary layer [7, 8]. Others [9, 10, 11] have also used a modified k- $\epsilon$  model to simulate turbulent wind flow through porous media, with great success.

In this paper, all the forests under consideration are dense and are considered semi-infinite. The first objective of this study is to develop a two-dimensional CFD model to simulate wind velocity and turbulence intensity near a forest edge and validate it using experimental measurements from three different authors [1, 2, 3]. The second objective is to develop a one-dimensional CFD model to obtain the fully developed wind flow over and through the forest, using its results as the inlet boundary condition in the two-dimensional CFD model for wind flow leaving the semi-infinite forest.

### 2.3 Mathematical model

In order to simplify the analysis, the following assumptions were made: incompressible flow, steady state, neutral atmosphere, horizontally homogeneous forest, flat terrain and negligible coriolis force. The assumption of negligible coriolis force was justified by the fact that only the atmospheric surface layer was considered. Furthermore, as a first step toward modeling the very complex flow within forests, the assumption of a neutral atmosphere is legitimate.

#### 2.3.1 Two-dimensional problem

In this section, the governing equations and the turbulence model for a two-dimensional problem on a flat terrain will be presented.

##### 2.3.1.1 Governing equations

Following the Einstein summation convention, the continuity equation and the momentum equation may be expressed as:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u'_i u'_j}) + S_{u,i}. \quad (2.2)$$

The source term  $S_{u,i}$  represents the momentum absorbed within the forest, while outside the forest,  $S_{u,i} = 0$  [10, 12, 13, 14, 15, 16]. By treating the forest as a porous medium, the source term may be expressed as :

$$S_{u,i} = -\rho C_D \alpha |u| u_i \quad (2.3)$$

where

- $\rho$  is the air density;
- $C_D$  is the drag coefficient of the forest;
- $\alpha$  is the leaf area density;
- $|u|$  is the magnitude of the wind velocity;
- $u_i$  is the wind velocity in the  $i$  direction.

The drag coefficient ( $C_D$ ) is representative of the ability of the forest to absorb momentum. It usually ranges between 0.15 and 0.3, depending on the forest type [12, 13, 15, 16]. In our model,  $C_D = 0.2$  was used following the recommendations of Katul [13]. The leaf area density ( $\alpha$ ) represents the number of square metres of leaf surface, trunk and branches within a cubic metre of forest. It is variable with height and depends on the type of forest considered. Measurements of  $\alpha$  may be done using destructive or optical methods [13, 14].

### 2.3.1.2 Turbulence model

The turbulence model chosen for the proposed method is a modified  $k - \epsilon$  model to which source terms were added to represent the generation and the dissipation of turbulence within the forest. The ability of the  $k - \epsilon$  turbulence model to simulate turbulent fluxes within and above a forest has been demonstrated by many authors [5, 9, 10, 17, 18].



Turbulent fluxes were represented using the Boussinesq hypothesis:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.4)$$

Turbulent viscosity was defined using the turbulent kinetic energy ( $k$ ) and the turbulent kinetic energy dissipation rate( $\epsilon$ ):

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.5)$$

The transport equations for  $k$  and  $\epsilon$  are:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon + S_k \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (2.7)$$

where  $G_k$  represents the turbulent kinetic energy generation due to strain:

$$G_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (2.8)$$

$S_k$  and  $S_\epsilon$  are source terms representative of the turbulence generation due to breakage of the mean-flow motion of the vegetation elements [10]:

$$S_k = \rho C_D \alpha [\beta_p |u|^3 - \beta_d k |u|] \quad (2.9)$$

$$S_\epsilon = \rho C_D \alpha \frac{\epsilon}{k} [C_{\epsilon 4} \beta_p |u|^3 - C_{\epsilon 5} \beta_d k |u|] \quad (2.10)$$

where  $|u|$  is the magnitude of the velocity and  $C_{\epsilon 4}$ ,  $C_{\epsilon 5}$ ,  $\beta_p$  and  $\beta_d$  are model constants. These source terms were only applied within the forest; above the forest  $S_k$  and  $S_\epsilon$  were null.

In order to adapt the standard  $k - \epsilon$  model to the atmospheric surface layer, it was necessary to modify the original constants proposed by Jones and Launder [6] (Table 1). To do so, the neutral surface layer ratios of standard deviations of velocity components to friction velocity were used [19] (Table 2).

$C_\mu$	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

Table I

Original constants of the  $k - \epsilon$  turbulence model

$\sigma_u/u_*$	$\sigma_v/u_*$	$\sigma_w/u_*$
2.4	2.1	1.25

Table II

Neutral surface layer ratios of standard deviations of velocity components to friction velocity

From these ratios,  $C_\mu$  was determined [10]:

$$C_\mu = \frac{1}{(0.5 [(\sigma_u/u_*)^2 + (\sigma_v/u_*)^2 + (\sigma_w/u_*)^2])^2} = 0.03 \quad (2.11)$$

Then,  $\sigma_\epsilon$  was determined from Eq. (2.12) [10].

$$\sigma_\epsilon = \frac{K^2}{\sqrt{C_\mu}(C_{\epsilon 2} - C_{\epsilon 1})} = 2.12 \quad (2.12)$$

where  $K$  is the von Karman constant ( $K=0.42$ ).

Using  $\beta_p = 1$  [5, 18],  $\beta_d$ ,  $C_{\epsilon 4}$  and  $C_{\epsilon 5}$  were evaluated as proposed by Sanz [9]:

$$\beta_d = \sqrt{C_\mu} \left( \frac{2}{0.05} \right)^{2/3} \beta_p + \frac{3}{\sigma_k} = 5.03 \quad (2.13)$$

$$C_{\epsilon 4} = C_{\epsilon 5} = \sigma_k \left[ \frac{2}{\sigma_\epsilon} - \frac{\sqrt{C_\mu}}{6} \left( \frac{2}{0.05} \right)^{2/3} (C_{\epsilon 2} - C_{\epsilon 1}) \right] = 0.78 \quad (2.14)$$

Table 3 presents a summary of all the constants of the modified  $k - \epsilon$  turbulence model. The major drawback of this turbulence closure is that it relies on the Boussinesq hypothesis. This implies that an isotropic turbulence was assumed. Despite this limitation, many authors [5, 10, 11] have demonstrated the ability of the model to simulate wind flow over and through a forest.

$C_\mu$	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$	$C_{\epsilon 4}$	$C_{\epsilon 5}$	$\beta_p$	$\beta_d$
0.03	1.44	1.92	1.0	2.12	0.78	0.78	1.0	5.03

Table III

Turbulence constants for the modified  $k - \epsilon$  turbulence model

### 2.3.2 Fully developed problem

Since the forest is semi-infinite, in order to prescribe the inlet boundary conditions of the two-dimensional problem it was necessary to obtain the fully developed solution (see section 2.4). To obtain the fully developed equations, the equations presented in section 2.3.1 were simplified by setting all the horizontal gradients to zero. The coordinate axis was chosen such that the  $z$  axis is perpendicular to the ground.

#### 2.3.2.1 Governing equations

The fully developed continuity equation simply represents the trivial solution ( $u = 0$ ), while the momentum equation is as follows:

$$0 = -\frac{dp}{dz} + \mu \frac{d^2 u}{dz^2} - \frac{d}{dz} (\overline{\rho u' w'}) + S_u \quad (2.15)$$

$$S_u = -\rho C_D \alpha u^2 \quad (2.16)$$

### 2.3.2.2 Turbulence model

The turbulence model used here is the same model that was proposed for the two-dimensional model. Turbulent flux was defined using the Boussinesq hypothesis (Eq. (2.17)) and the turbulent viscosity (Eq. (2.5)):

$$-\rho \overline{u'w'} = \mu_t \frac{du}{dz} \quad (2.17)$$

The simplified transport equations for  $k$  and  $\epsilon$  are:

$$0 = \frac{d}{dz} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{dk}{dz} \right] + G_k - \rho\epsilon + S_k \quad (2.18)$$

$$0 = \frac{d}{dz} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{d\epsilon}{dz} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (2.19)$$

$$G_k = \mu_t \left( \frac{du}{dz} \right)^2 \quad (2.20)$$

$$S_k = \rho C_D \alpha [\beta_p u^3 - \beta_d k u] \quad (2.21)$$

$$S_\epsilon = \rho C_D \alpha \frac{\epsilon}{k} [C_{\epsilon 4} \beta_p u^3 - C_{\epsilon 5} \beta_d k u] \quad (2.22)$$

The model constants presented in Table 3 were used.

## 2.4 Numerical Method

In order to solve the equations presented in section 2.3, the commercial software FLUENT 6.2 was used. FLUENT uses a control-volume-based technique to convert the governing equations to algebraic equations that can be solved numerically. In this paper, the SIMPLEC pressure-velocity coupling method was used to accelerate convergence. The PRESTO pressure interpolation scheme was used because the problem involved porous

media [20] and the QUICK interpolation scheme was used for all other dependent properties, since it is known to be accurate on structured grids aligned with the flow direction [20]. One advantage of using FLUENT 6.2 is that it has already demonstrated its ability to simulate the atmospheric surface layer [8, 21].

## 2.4.1 Two-dimensional problem

### 2.4.1.1 Domain and grid

Computations were performed on a two-dimensional  $x - z$  domain which was 800 m high and 1000 m long (see Fig. 1). The forest edge was located 300 m from the inlet. The domain was divided into 199 ( $x$ -direction) and 102 ( $z$ -direction) non-uniform rectangular grids. The shortest distance between horizontal grid points was used at the forest edge ( $\Delta x = 2.5$  m). Grid size increased away from the forest edge up to  $\Delta x = 7$  m at the inlet and  $\Delta x = 20$  m at the outlet. The shortest distance between vertical grid points was used at the ground ( $\Delta z = 0.2$  m). Grid size increased with altitude up to  $\Delta z = 50$  m at the top of the calculation domain. The domain contained a total of 20,298 control volumes.

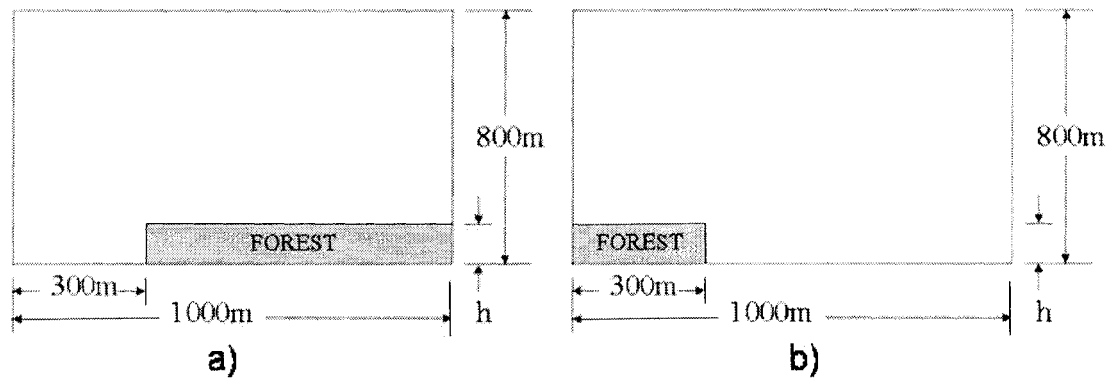


Figure 1 Calculation domain for wind flow a) entering and b) leaving the forest

### 2.4.1.2 Boundary conditions (wind flow entering the forest)

At the **inlet and top boundaries**, the logarithmic wind profile [22] and the turbulence quantities as proposed by Panofsky and Dutton [23] were imposed. These equations rep-

resent the analytical solution of the conservation equations for a fully developed wind flow on a flat terrain described by a roughness length ( $z_o$ ).

$$u = \frac{u_*}{K} \ln \left( \frac{z}{z_o} \right) \quad (2.23)$$

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (2.24)$$

$$\epsilon = \frac{u_*^3}{Kz} \quad (2.25)$$

where  $z_o$  is the roughness length representative of the roughness of the ground upwind of the forest. The friction velocity  $u_*$  was evaluated using a reference velocity, the velocity imposed at the top of the domain ( $u_{top}$ ), and a reference height, the height of the domain ( $z_{top}$ ):

$$u_* = \frac{Ku_{top}}{\ln \left( \frac{z_{top}}{z_o} \right)} \quad (2.26)$$

At the **outlet boundary**, the outflow condition defined by Patankar [24] was used.

On the **ground outside the forest**, the approach proposed by Richards and Hoxey [7] was used. Using this approach, the wind flow below  $z_o$  was not modeled; the computational domain had its bottom boundary at a height  $z = z_o$  (Fig. 2). Using the velocity at the centroid of Cell 2 ( $u_2$ ) and the height of the centroid of Cell 2 ( $z_2$ ), it was possible to define a local friction velocity ( $u_{*,l}$ ) which was a function of the roughness length  $z_o$ .

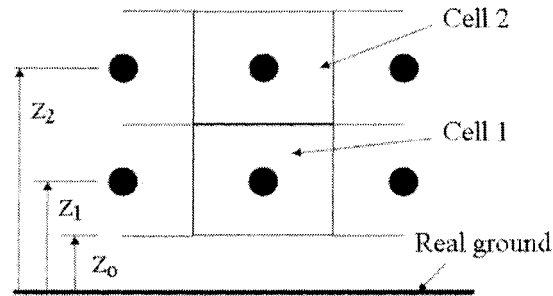


Figure 2 First two rows of cells near the ground

$$u_{*,l} = \frac{u_2 K}{\ln \left( \frac{z_2}{z_o} \right)} \quad (2.27)$$

Using  $z_o$ , it was possible to calculate the velocity ( $u_1$ ), the turbulent kinetic energy ( $k_1$ ) and the turbulent kinetic energy dissipation rate ( $\epsilon_1$ ) at the centroid of cell 1 using the logarithmic wind profile [22] and the turbulence quantities as proposed by Panofsky and Dutton [23].

$$u_1 = \frac{u_{*,l}}{K} \ln \left( \frac{z_1}{z_o} \right) \quad (2.28)$$

$$k_1 = \frac{u_{*,l}^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (2.29)$$

$$\epsilon_1 = \frac{u_{*,l}^3}{K z_1} \quad (2.30)$$

This was an iterative process since a new value of  $u_{*,l}$  was calculated at every iteration. This procedure was implemented using user-defined functions (UDF) in Fluent 6.2.

On the **ground within the forest**, a transition function was used. Far from the edges of the forest, the shear stress at the ground is negligible [10]. This implies that far from the edges, the ground conditions are similar to those of a full-slip wall. To make a transition from the roughness length boundary condition upwind of the edge to a full slip wall boundary condition deep within the forest, the velocity and turbulence quantities at cell 1 were prescribed as follows:

$$u_1 = f u_{z_o} + (1 - f) u_{fs} \quad (2.31)$$

$$k_1 = f k_{z_o} + (1 - f) k_{fs} \quad (2.32)$$

$$\epsilon_1 = f \epsilon_{z_o} + (1 - f) \epsilon_{fs} \quad (2.33)$$

where  $f$  was the transition coefficient:

$$f = \begin{cases} 0 & u_{*,l} \leq 0 \\ \frac{u_{*,l}}{u_{*,l,edge}} & 0 < u_{*,l} < u_{*,l,edge} \\ 1 & u_{*,l} \geq u_{*,l,edge} \end{cases} \quad (2.34)$$

$u_{*,l}$ , the local friction velocity, was calculated using Eq. (2.27) and  $u_{*,l,edge}$  was the value of  $u_{*,l}$  at the edge. This was done to ensure that outside the forest  $f$  was always equal to 1.  $u_{z_o}$ ,  $k_{z_o}$  and  $\epsilon_{z_o}$  were calculated using the logarithmic wind profile [22] and the turbulence quantities as proposed by Panofsky and Dutton [23] using the roughness length ( $z_o$ ) outside the forest:

$$u_{z_o} = \frac{u_{*,l}}{K} \ln \left( \frac{z_1}{z_o} \right) \quad (2.35)$$

$$k_{z_o} = \frac{u_{*,l}^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (2.36)$$

$$\epsilon_{z_o} = \frac{u_{*,l}^3}{K z_1} \quad (2.37)$$

$u_{fs}$ ,  $k_{fs}$  and  $\epsilon_{fs}$  were calculated using a full-slip boundary condition:

$$u_{fs} = u_2 \quad (2.38)$$

$$k_{fs} = k_2 \quad (2.39)$$

$$\epsilon_{fs} = \epsilon_2 \quad (2.40)$$

#### 2.4.1.3 Boundary conditions (wind flow leaving the forest)

At the **outlet boundary**, the outflow condition defined by Patankar [24] was imposed. On the **ground outside the forest** and on the **ground within the forest**, the boundary conditions were the same as for the wind flow entering the forest (see section 2.4.1.2).

At the **inlet and top boundaries**, the wind velocity and turbulence quantities obtained from the fully developed solution were imposed (see section 2.4.2). In the past, empirical solutions have been proposed by various authors [12, 23, 25, 26]. These solutions were not used here as the inlet boundary condition, since they are not solutions to the proposed model. For this reason, it was chosen to use a fully developed solution obtained using the proposed method as the inlet boundary condition of the two-dimensional problem.



## 2.4.2 Fully developed problem

In order to define the inlet boundary condition of the two-dimensional model for the wind flow leaving the forest, a one-dimensional solution representative of the fully developed wind flow over and through a forest was obtained. In FLUENT 6.2, this was done using a User-Defined Scalar (UDS) representative of the wind velocity.

### 2.4.2.1 Domain and grid

The calculation domain was one metre wide and 800 m high and was composed of only one column of cells. The domain was divided into 172 non-uniform rectangular grids. The shortest distance between the grid points was used at the ground ( $\Delta z = 0.07$  m). Grid size increased with altitude up to  $\Delta z = 50$  m near the top of the domain.

### 2.4.2.2 Boundary conditions

On the **side boundaries**, a symmetry condition was used. At the **ground boundary**, a full-slip condition was used since the shear stress on the ground is negligible for dense forests [10]. A dense forest is defined as a forest where the shear stress near the ground is small compared to the local drag force generated by the forest [10, 27]. The two forests analyzed in this paper meet this criteria.

At the **top boundary**, an original boundary condition was used. This boundary condition assumed that, at the top of the domain, the wind profile follows a logarithmic profile such that the friction velocity at the top of the domain ( $u_{*,fd}$ ) is constant. This assumption was validated during the numerical simulations. At the top of the domain, the velocity  $u_n$  was prescribed. Using this velocity, the turbulent kinetic energy ( $k_n$ ) and the dissipation rate of turbulent kinetic energy ( $\epsilon_n$ ) were calculated. To do so,  $u_{*,fd}$  was defined using the velocities at the centroid of the two cells adjacent to the top boundary ( $u_n$  and  $u_{n-1}$ ) (see Fig. 3). Again,  $u_n$  was prescribed, while  $u_{n-1}$  was the value at the centroid of the second-to-last cell adjacent to the top boundary obtained from the previous iteration. Iterations were done until a converged value of  $u_{n-1}$  was obtained.  $u_{*,fd}$  was calculated at every iteration using Eq. (2.41).

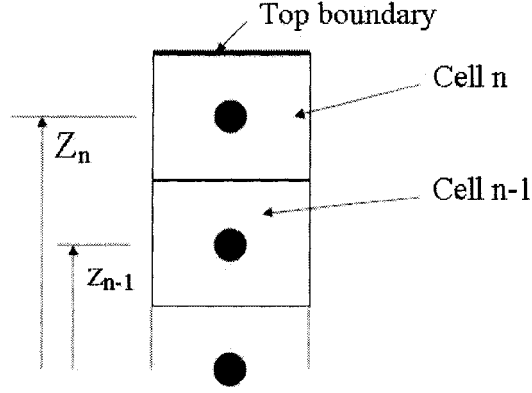


Figure 3 Two rows of cells at the top of the domain

$$u_{*,fd} = \frac{(u_n - u_{n-1}) K}{\ln(z_n/z_{n-1})} \quad (2.41)$$

Using this friction velocity,  $k_n$  and  $\epsilon_n$  were prescribed using the equations proposed by Stull [22], and by Panofsky and Dutton [23]:

$$k_n = \frac{u_{*,fd}^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (2.42)$$

$$\epsilon_n = \frac{u_{*,fd}^3}{K z_n} \quad (2.43)$$

## 2.5 Experimental measurements

In order to validate the proposed method, experimental measurements from three different authors were used. To validate the model for wind flow entering the forest, the Irvine et al. [3] study was used. To validate the model for wind flow leaving the forest, it was necessary to consider two different studies since neither of them was complete. The first study, by Raynor [1], did not provide turbulence measurements, while the second study, by Gash [2], provided measurements only at one height above the forest.

### 2.5.1 Irvine et al. [3]

The proposed method was used to simulate the measured flow field analyzed by Irvine et al. [3]. Velocity and turbulence measurements were taken across a transition from a moorland to a forest at Harwood Forest in England. The site had an elevation of 260 m with a gentle northwest - southeast slope. The forest considered was a uniform plantation of Sitka spruce planted in 1973. Average tree height ( $h$ ) was 7.5 m. The edge of the forest was extremely straight and ran west northwest - east southeast with an open ground to the southwest almost entirely composed of rough pasture ( $z_o = 0.0028$  m). Irvine et al. [3] estimated the leaf area index (LAI) of the forest to be 2.15. Since no information about the leaf area density ( $\alpha$ ) was given, the leaf area density presented in Fig. 4a was assumed. This distribution was chosen in order to obtain the best fit between experimental data from Irvine et al. [3] and the numerical simulations.

Measurements were obtained from four 15-m high triangular lattice towers:

- Mast 1 was located  $6.1 h$  upwind of the forest edge;
- Mast 2 was located at the forest edge;
- Mast 3 was located  $3.6 h$  downwind of the forest edge;
- Mast 4 was located  $14.5 h$  downwind of the forest edge.

Two types of three-dimensional propeller anemometers were installed: Gill and Leda (Table 4). Data was recorded at a 10-Hz frequency during two periods: May-June 1993 and October-November 1993. The measurements were obtained during three periods of 35 to 40 minutes each. The conditions were either neutral or slightly unstable and only wind directions within  $15^\circ$  of normal to the edge were analyzed.

### 2.5.2 Raynor [1]

Wind velocity measurements were obtained near a transition from a forest to an open field. The forest was planted in 1939 on a flat terrain belonging to the Brookhaven National Laboratory at Upton, Long Island, New York, and was composed almost entirely (91%)

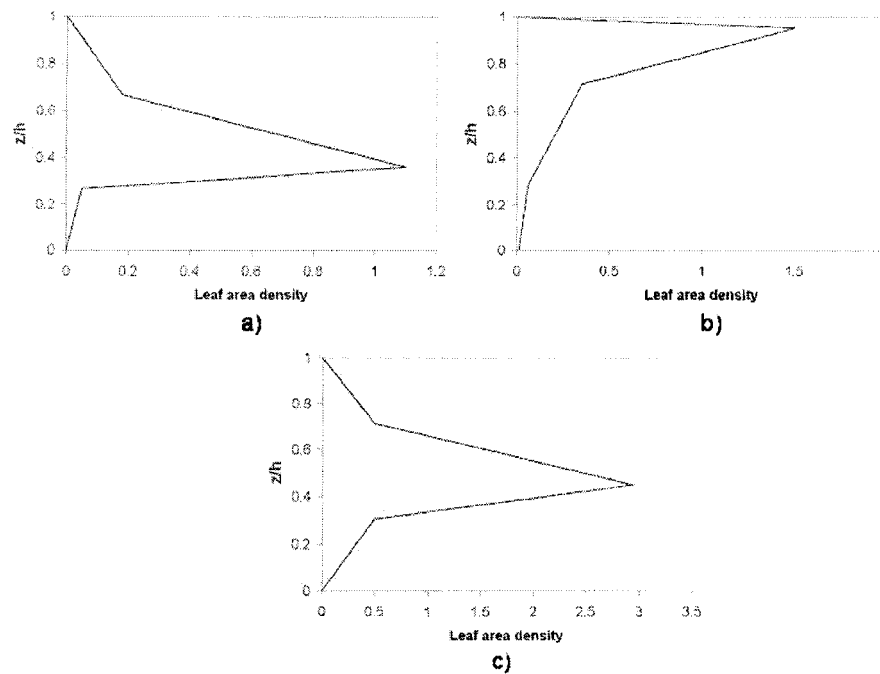


Figure 4 Assumed leaf area density distribution for the: a) Irvine et al. [3] study, b) Raynor [1] study and c) Gash [2] study

of pines. The domain under study had an area of 6,000 square metres and was composed of 881 trees for an average of 1,474 trees per hectare. The forest had an average height ( $h$ ) of 10.5 m and the edge of the forest ran along an east-west line. South of the edge was an open field covered with grass, weeds and low brush. Since no roughness length ( $z_o$ ) had been specified, it was estimated to be 0.1 m. Since no information had been provided about the leaf area density of the forest, a leaf area density that allowed a best fit between the numerical simulations and the experimental measurements was assumed (see Fig. 4b). Velocity measurements were obtained using five 14-m high triangular steel towers:

- Mast 1 was located  $9.52 h$  upwind of the forest edge;
- Mast 2 was located  $5.71 h$  upwind of the forest edge;
- Mast 3 was located  $1.9 h$  upwind of the forest edge;
- Mast 4 was located at the forest edge;

- Mast 5 was located  $3.81 h$  downwind of the forest edge.

All the anemometers used were cup anemometers designed at the Brookhaven National Laboratory. Data were collected intermittently over a 5-years period (1963-1968) during runs of one-half to one hour.

### 2.5.3 Gash [2]

Wind velocity and turbulence measurements were obtained on a flat terrain at the Thetford Forest in East Anglia, England. The forest was composed of a mixture of Scots pine, European larch and Corsican pine, with a stem density of approximately 4,400 stems per hectare. The mean height of the forest ( $h$ ) was 9.8 m. Since no information was given concerning the leaf area density of the forest, a leaf area density that allowed a best fit between the numerical simulations and the experimental measurements was assumed (see Fig. 4c). Outside the forest, the ground was almost entirely covered with heather 0.25 m high ( $z_o = 0.028$  m). The velocity measurements were obtained with three pairs of Gill propeller anemometers mounted at right angles in the horizontal plane. The upwind reference position was located 25 m from the edge over the forest and the downwind reference position was over the heath at 700 m from the interface. The third instrument was deployed over the heath at 50, 100, 200 and 400 m from the edge over the heath. Over the heath, the anemometers were mounted 3.5 m above the ground and, over the forest, the instruments were mounted at a height of 13.5 m. Measurements were made during the winter of 1983-1984. Wind direction was considered acceptable when the hourly average was within plus or minus 45 degrees of the line of the instruments, which was at right angle to the forest edge. Gash separated the results into three groups: stable, unstable and neutral. Only the neutral cases were considered in this paper.

## 2.6 Results

This section presents a comparison between the experimental measurements and the results of the CFD simulations for the two wind directions (wind flow entering and wind flow leaving the forest). Wind velocity results are presented as the ratio of the predicted velocity over a reference velocity ( $u_{ref}$ ), and the turbulence results as turbulence inten-

sity (TI). Turbulence intensity was calculated using Eq. (2.44) and Eq. (2.45) for the simulations and the experimental measurements, respectively.

$$TI = \frac{\sqrt{2/3k}}{u} \quad (2.44)$$

$$TI = \frac{\sqrt{1/3(\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2)}}{u} \quad (2.45)$$

The coordinate system used to present the result is such that the edge is located at  $x/h = 0$ .

### 2.6.1 Wind flow entering the forest

To validate the proposed method for wind flow entering a forest, the experimental measurements obtained from Irvine et al. [3] were used. The reference velocity ( $u_{ref}$ ) was taken to be the velocity measured by Irvine et al. [3] at height  $z/h = 2$  on Mast 1 ( $u_{ref}=6.28$  m/s). Since  $\sigma_v$  was not measured by Irvine et al. [3], the standard value for a neutral surface layer on a flat terrain ( $\frac{\sigma_v}{u_*} = 2.1$  [19]) was assumed.

#### 2.6.1.1 Best fit results

To simulate the experimental measurements done by Irvine et al. [3], a drag coefficient ( $C_d$ ) of 0.2 and the leaf area density ( $\alpha$ ) presented in Fig. 4a were used. This leaf area density distribution had a LAI of 2.15. Figures 5a to 5d show the comparison between the measured and simulated wind velocities and turbulence intensities for the four masts, while Figures 6a and 6b present the streamlines and the pressure contours, respectively. For the wind velocity, the proposed method agrees very well with the measurements. The proposed method captures the features characteristic of the wind flow within and above a forest. One example of this is the model's ability to simulate the wind acceleration observed at  $z/h = 2$  at Mast 3. This feature was observed by Irvine et al. [3] and Li et al. [4], and can be explained by the low-pressure region just back from the edge (see Fig. 6b). The turbulence intensity results obtained slightly underestimate the turbulence intensity at Masts 1 and 2 for heights below  $z/h \leq 2$ . Such a behaviour by the  $k - \epsilon$  turbulence model has been observed by Alinot and Masson [8]. Part of this underestimation can also be attributed to the assumed value of  $\frac{\sigma_v}{u_*} = 2.1$ . The proposed model yielded turbulence intensities far from the measurements within the forest at Masts 3 and 4. The most plausi-

ble explanation for this is the excessive velocity predicted by the model below  $z/h = 0.5$ . The lack of experimental data below  $z/h = 0.5$  does not permit a validation of this hypothesis. However, the model's predictions for the turbulence intensities are in very good agreement with the measurements above the forest at Masts 3 and 4. The average relative error between the proposed method and the experimental measurements was 10.6% for wind velocity and 27.6% for turbulence intensity.

#### 2.6.1.2 Drag coefficient ( $C_d$ ) sensitivity analysis

To obtain the best-fit results presented in section 2.6.1.1,  $C_d = 0.2$  was used. In order to verify the impact of this choice on the solution, a sensitivity analysis was performed.  $C_d$  was varied from 0.1 to 0.3: these are typical values for different types of forest [10, 13]. From Fig. 7 and 8, it can be seen that the choice of  $C_d$  has a significant impact on the wind flow within the forest. Above the forest, the solution is almost independent of  $C_d$ . As expected, a high  $C_d$  value reduced the wind velocity and increased the turbulence intensity within the forest. An interesting characteristic of the solution is the recirculation zone in the lowest part of the forest for  $C_d = 0.3$ . This recirculation zone was caused by a low-pressure region created only when sufficiently high values of  $C_d$  were involved. More experimental data close to the ground would be necessary in order to validate this feature of the proposed method.

#### 2.6.1.3 Leaf area density ( $\alpha$ ) sensitivity analysis

Another parameter that was assumed in section 2.6.1.1 is the leaf area density ( $\alpha$ ) (see Fig. 4a). In order to see the impact of this choice, three different leaf area density distributions ( $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  and  $\alpha_3$ ), all having a LAI = 2.15, were investigated. The three leaf area density distributions are presented in Fig. 9. Figure 10 shows the influence of the leaf area density on wind velocity and turbulence intensity. The effects of the various leaf area density distributions on wind flow are visible on Fig. 10.  $\alpha_1$  created significantly larger velocities than  $\alpha_2$  and  $\alpha_3$  near the ground, due to the low leaf area density in the lowest part of  $\alpha_1$ . Figure 11 shows streamlines for the three leaf area density distributions. As noticed for  $C_d = 0.3$  in section 2.6.1.2, a recirculation zone was located within the forest just back from the edge. Size and location of the recirculation zone were strongly dependent

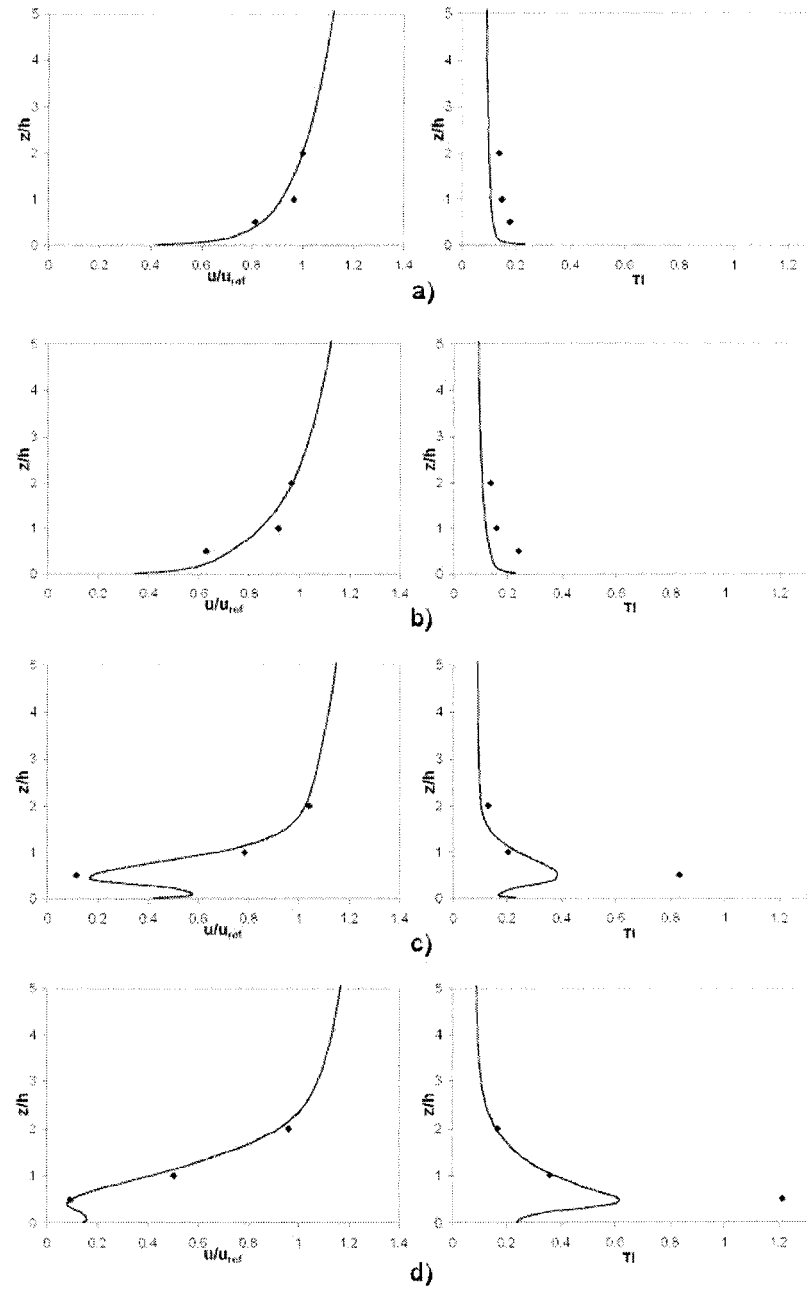


Figure 5 Simulation of the Irvine et al. [3] study: comparison between the proposed method (solid line) and experimental measurements (diamond) for a) Mast 1 ( $x/h = -6.1$ ), b) Mast 2 ( $x/h = 0$ ), c) Mast 3 ( $x/h = 3.6$ ) and d) Mast 4 ( $x/h = 14.5$ )



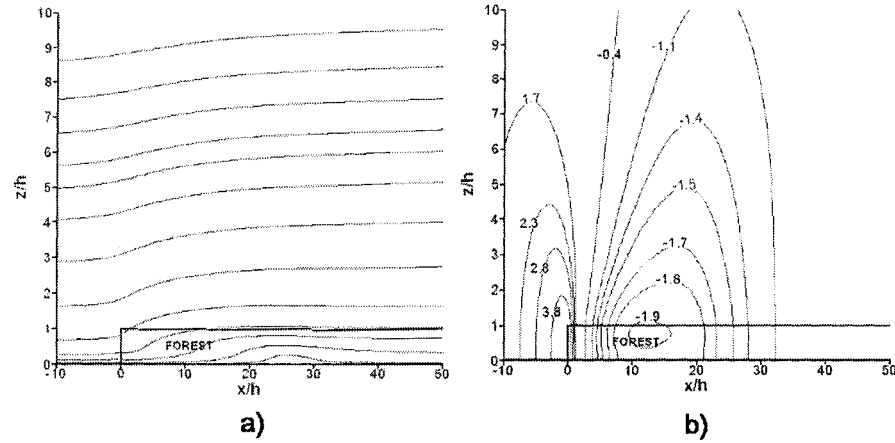


Figure 6 Simulation of the Irvine et al. [3] study: a) streamlines and b) computed pressure field (gauge pressure in Pascals)

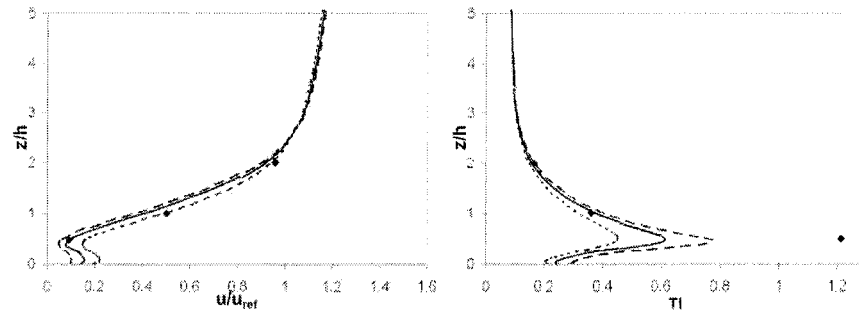


Figure 7 Drag coefficient ( $C_d$ ) sensitivity analysis:  $C_d = 0.1$  (dotted line),  $C_d = 0.2$  (solid line),  $C_d = 0.3$  (dashed line) and experimental measurements (diamond) for Mast 4 ( $x/h=14.5$ )

upon leaf area density.  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  and  $\alpha_3$  all created recirculation zones that were located respectively around  $x/h = 35$ ,  $x/h = 20$  and  $x/h = 12$ . Not only the position, but also the strength was dependent on the leaf area density.  $\alpha_2$  created the largest recirculation zone, while  $\alpha_1$  and  $\alpha_3$  created smaller recirculation zone of comparable sizes. One conclusion can be drawn from these results: a large leaf area density near the ground increased the strength of the recirculation zone. When a small leaf area density was present near the ground, the wind flow was more intense in the lowest part of the forest (see Fig. 10). This

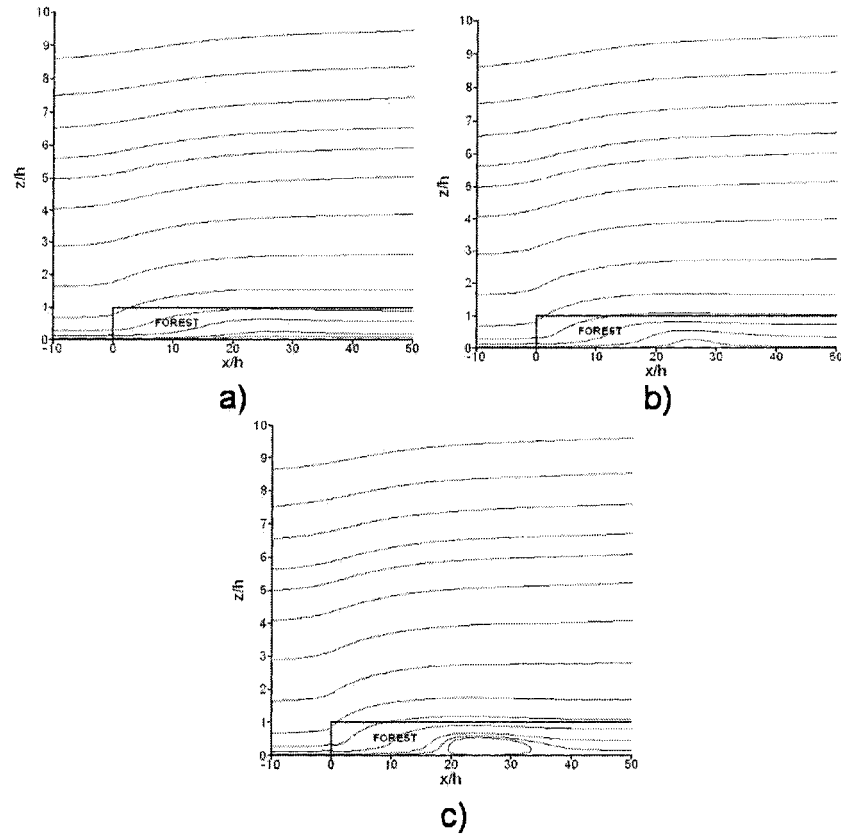


Figure 8 Drag coefficient ( $C_d$ ) sensitivity analysis: streamlines for a)  $C_d = 0.1$ , b)  $C_d = 0.2$  and c)  $C_d = 0.3$

restrained the creation of a low-pressure region, causing the reverse flow. By contrast, when the leaf area density was very dense in the lowest part of the forest, such as  $\alpha_2$ , the recirculation zone was more intense since no force opposed the back-flow motion in the lowest part of the forest. Again, as expected, an increase in leaf area density created an increase in turbulence intensity.

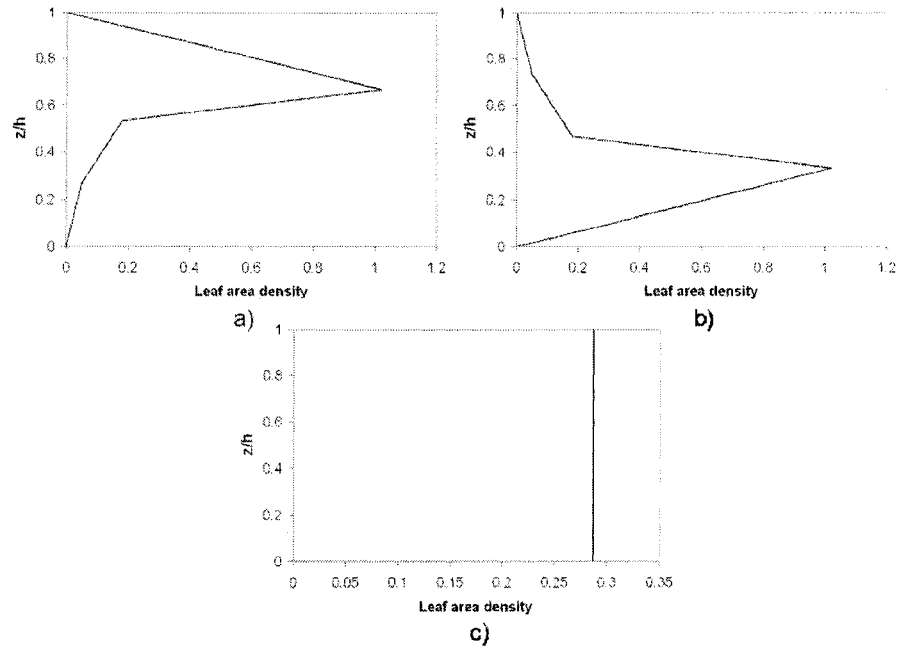


Figure 9 Leaf area density ( $\alpha$ ) sensitivity analysis: a)  $\alpha_1$ , b)  $\alpha_2$  and c)  $\alpha_3$

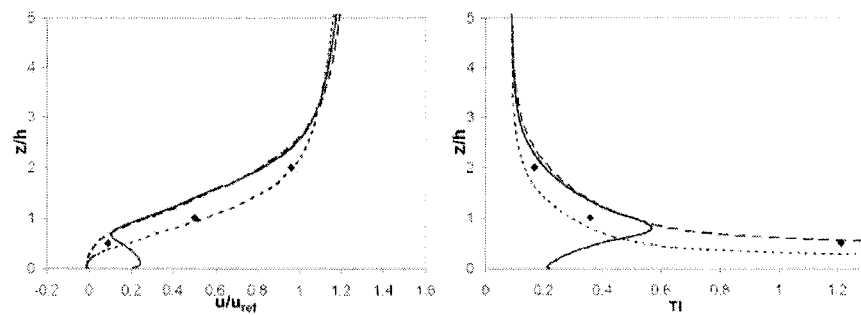


Figure 10 Leaf area density ( $\alpha$ ) sensitivity analysis:  $\alpha_1$  (solid line),  $\alpha_2$  (dotted line),  $\alpha_3$  (dashed line) and experimental measurements (diamond) for Mast 4 ( $x/h=14.5$ )

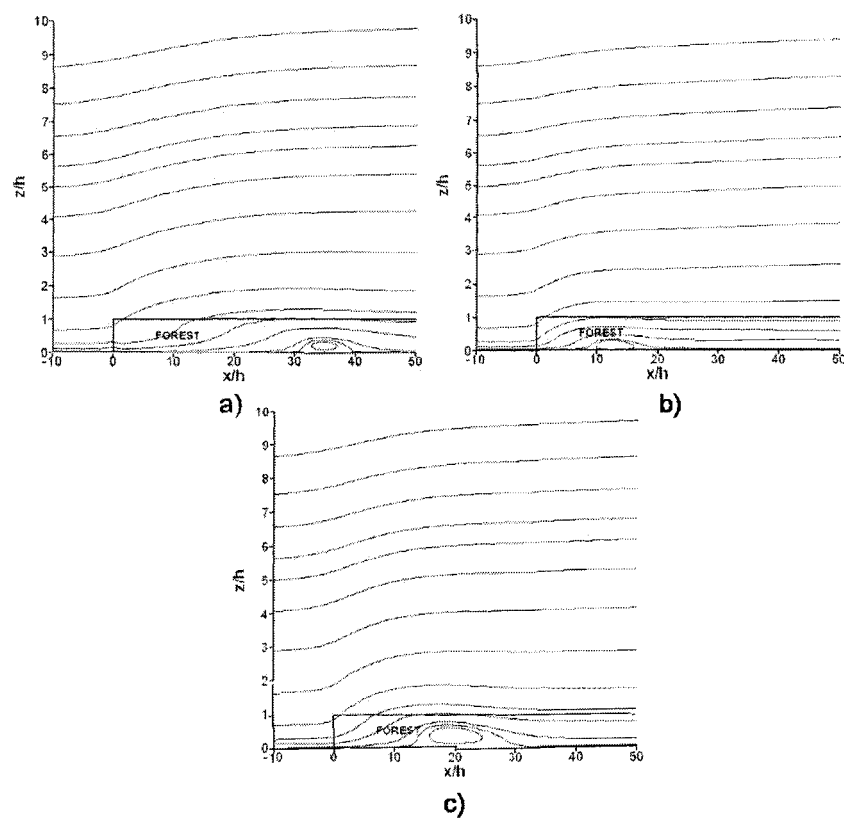


Figure 11 Leaf area density ( $\alpha$ ) sensitivity analysis: streamlines for a)  $\alpha_1$ , b)  $\alpha_2$  and c)  $\alpha_3$

## 2.6.2 Wind flow leaving the forest

The reason for simulating two different forests rather than just one is that neither the Raynor [1] nor the Gash [2] experiment was complete. The Raynor [1] experiment did not provide turbulence intensity results, while the Gash [2] experiment provided presented velocity and turbulence intensity measurements at only one height. In this section, the turbulence intensity results are presented in the form of a turbulence intensity ratio ( $TI/TI_{ref}$ ). This was necessary, since in the Gash [2] experiment the results are presented as a turbulence intensity ratio, and the reference value ( $TI_{ref}$ ) was not given.

### 2.6.2.1 Simulation of the Raynor [1] experiment

For wind velocity results, the reference velocity ( $u_{ref}=2.98\text{m/s}$ ) measured experimentally by Raynor [1] at  $z/h = 1.33$  on Mast 1 was used. For turbulence intensity, since no turbulence intensity measurements were taken by Raynor [1], the reference value obtained via the proposed method at  $z/h = 1.33$  and  $x/h = -9.52$  ( $TI_{ref}=51.9\%$ ) was used. Figure 12 presents the simulated, fully developed wind velocity and turbulence intensity profiles that were used as the inlet boundary condition for the two-dimensional model. From Fig. 12, it can be seen that the forest creates a significant reduction in wind velocity and an increase in turbulence intensity. One characteristic of the fully developed model is its none-zero velocity at the ground surface. This characteristic is created by the full-slip boundary condition imposed at ground level. Obviously, the assumption of a full-slip condition at the ground surface is not physically true, but since the forest is dense, the effect of the ground's roughness on the wind profile within and above the forest is assumed to be negligible. This hypothesis was tested by applying a roughness length boundary condition at the lowest part of the forest. Results confirmed that the roughness length had negligible impact on the wind velocity and turbulence intensity profiles.

Using the profiles obtained from the one-dimensional model, a CFD solution was obtained for the two-dimensional problem. Figures 14a and 14b show streamlines and pressure contours respectively. The pressure contours (Fig. 14b) are very similar to those obtained by Li et al. [4] with a low-pressure region at the edge. Fig. 13a to 13e show the results in the form of wind velocity and turbulence intensity profiles at five different mast positions.

Masts 1 to 4 (Fig. 13a to 13d) show a very good fit between the wind velocity experimentally measured by Raynor [1] and the results of the proposed method in the highest part of the forest and just above it. In the lowest part of the forest, on Mast 1 and 2 (Fig. 13a and 13b), the proposed method slightly underestimates wind velocity. On Mast 5 (Fig. 13e), the proposed method underestimates wind velocity. Liu et al. [5], who also used a modified  $k-\epsilon$  turbulence model, noted this characteristic of their model when it was compared to wind tunnel measurements. As explained by Liu et al. [5], a possible cause for this behaviour may be the  $k-\epsilon$  model: the isotropy assumption implicit in this turbulence model might explain why the proposed method is not accurate just behind the edge. The average relative error between experimental measurements and the proposed method is 9.9%.

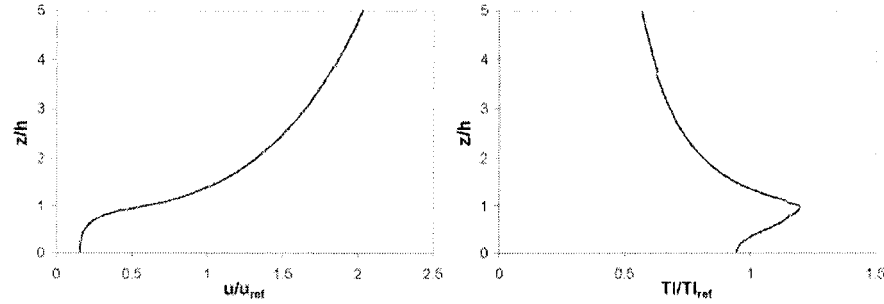


Figure 12 Simulation of the Raynor [1] study: fully developed solution (inlet boundary condition)

### 2.6.2.2 Simulation of the Gash [2] experiment

The wind velocity reference value was taken to be the value experimentally measured by Gash [2] at  $z/h = 1.38$  on Mast 1 ( $u_{ref}=3\text{m/s}$ ). The turbulence intensity reference value was taken to be the value obtained using the proposed method at  $z/h = 1.38$  and  $x/h = -2.55$  ( $TI_{ref}=50.8\%$ ). As presented in section 2.6.2.1, a fully developed solution (Fig. 15) was first obtained. This solution was used as the inlet boundary condition for the two-dimensional model. Figures 17a and 17b present the streamlines and pressure contours obtained using the proposed method. Both the streamlines and pressure contours are very similar to those obtained by Raynor [1]. From Fig. 16a to 16d, a significant increase in velocity is observed near the ground. This can be explained by the downward

momentum transport, which progressively increases the wind velocity near the ground with increasing distance from the forest edge. From Fig. 16a to 16d, the proposed method generally overestimates wind velocity. One possible explanation for this behaviour is a poorly chosen leaf area density distribution (see section 2.5.3). When comparing the results of the CFD simulation to the wind velocity experimentally measured, the average relative error was 12.6%.

Within the forest (Fig. 16a), the turbulence intensity profile shows a local maximum near the top of the forest. Outside the forest and with increasing distance from the forest edge, turbulence intensity decreases (Fig. 16b to 16d). Far from the edge, turbulence intensity becomes almost constant with height, which is expected for a neutral surface layer. The results of the CFD simulations shown in Fig. 16a to 16d overestimate the turbulence intensity near the ground. When comparing the experimental measurements to the simulated turbulence intensity results, the average relative error was 19.8%. Unfortunately, since Gash [2] obtained experimental measurements at one height only, it is impossible to validate the proposed method at a higher altitude outside the forest.

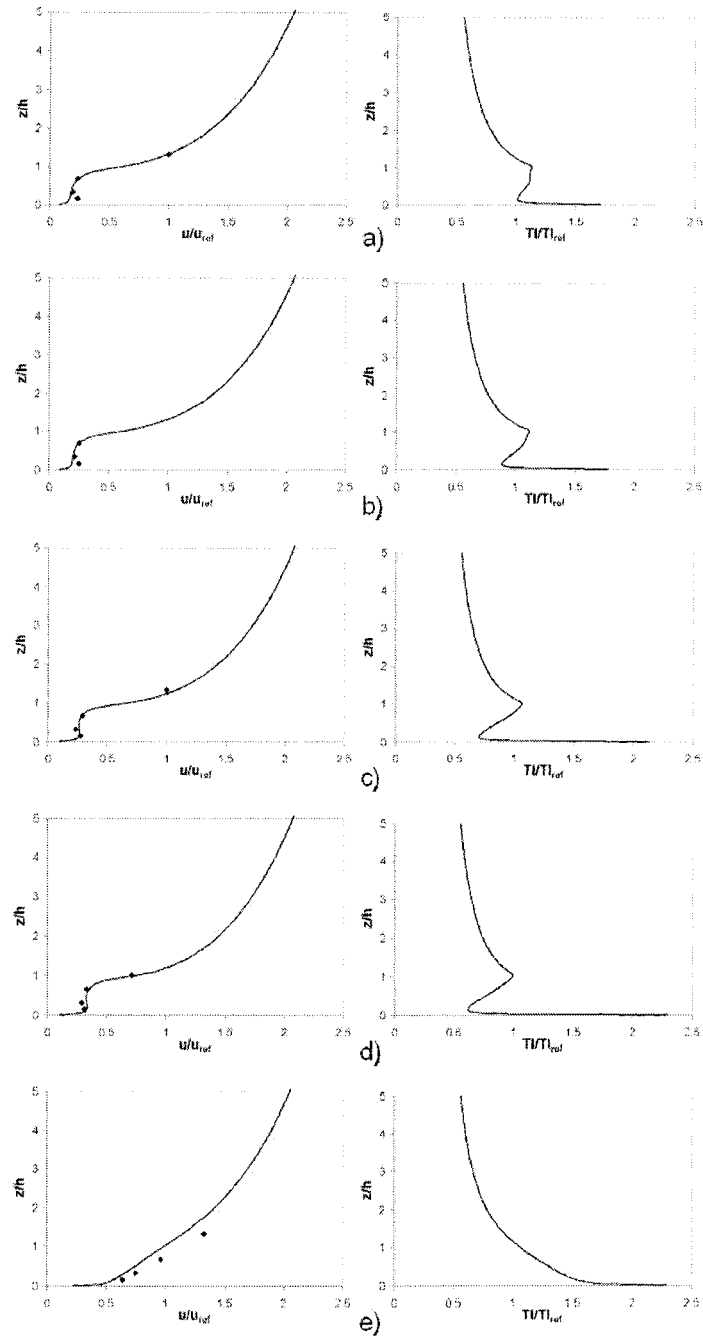


Figure 13 Simulation of the Raynor [1] study: comparison between the proposed method (solid line) and the experimental measurements (diamond) for a) Mast 1 ( $x/h=-9.52$ ), b) Mast 2 ( $x/h=-5.71$ ), c) Mast 3 ( $x/h=-1.9$ ), d) Mast 4 ( $x/h=0$ ) and e) Mast 5 ( $x/h=3.81$ )



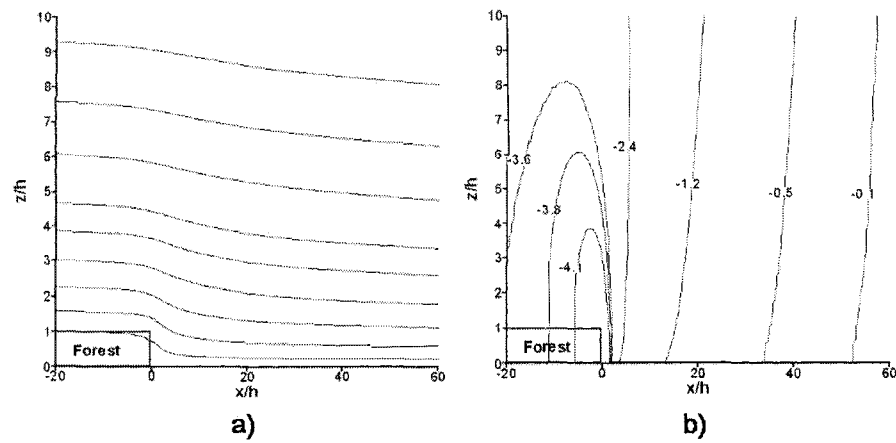


Figure 14 Simulation of the Raynor [1] study: a) streamlines and b) computed pressure field (gage pressure in Pascals)

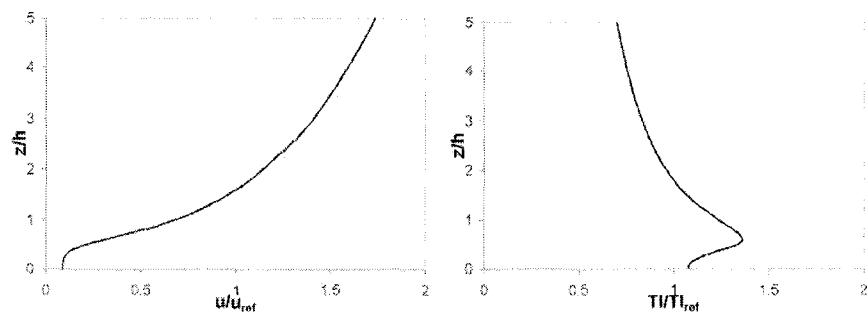


Figure 15 Simulation of the Gash [2] study: fully developed solution (inlet boundary condition)

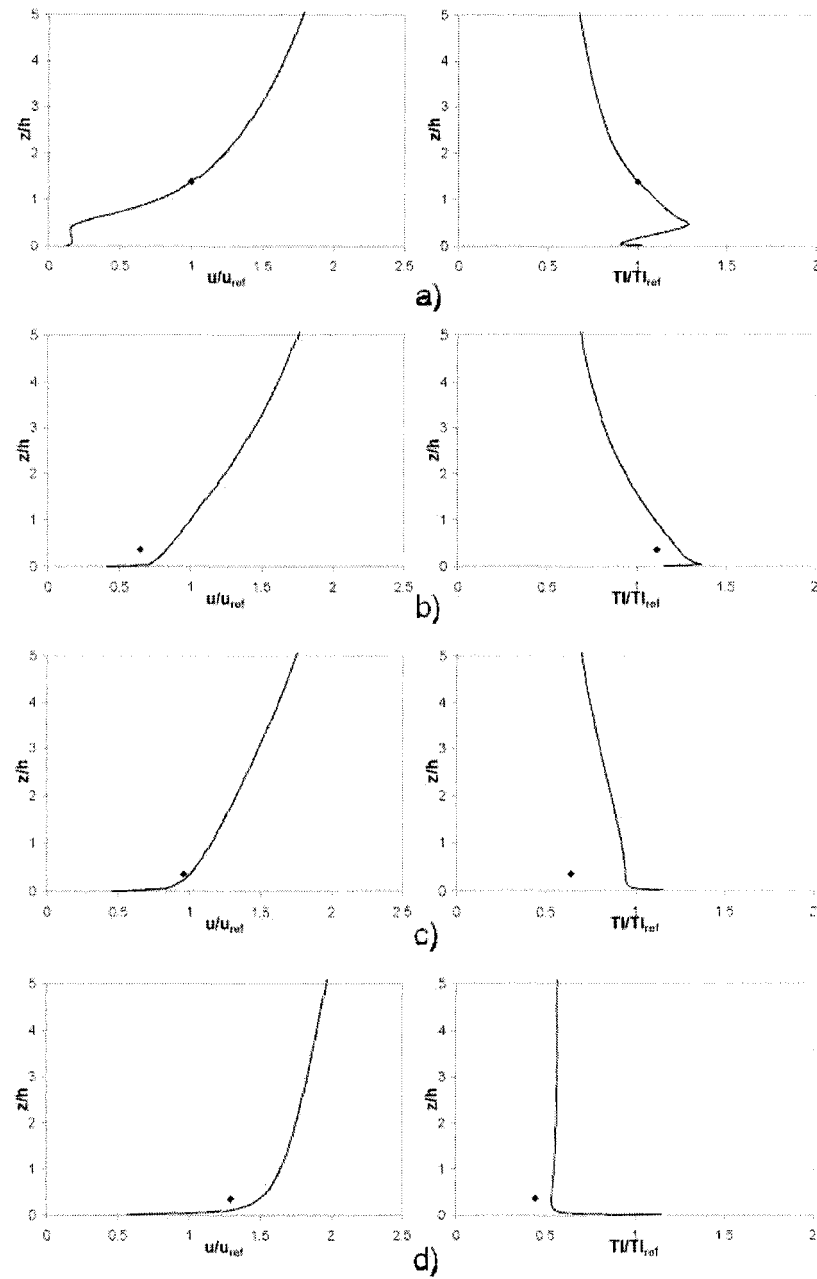


Figure 16 Simulation of the Gash [2] study: comparison between the proposed method (solid line) and the experimental measurements (diamond) for a) Mast 1 ( $x/h = -2.55$ ), b) Mast 2 ( $x/h = 5.1$ ), c) Mast 3 ( $x/h = 10.2$ ) and d) Mast 4 ( $x/h = 71.43$ )

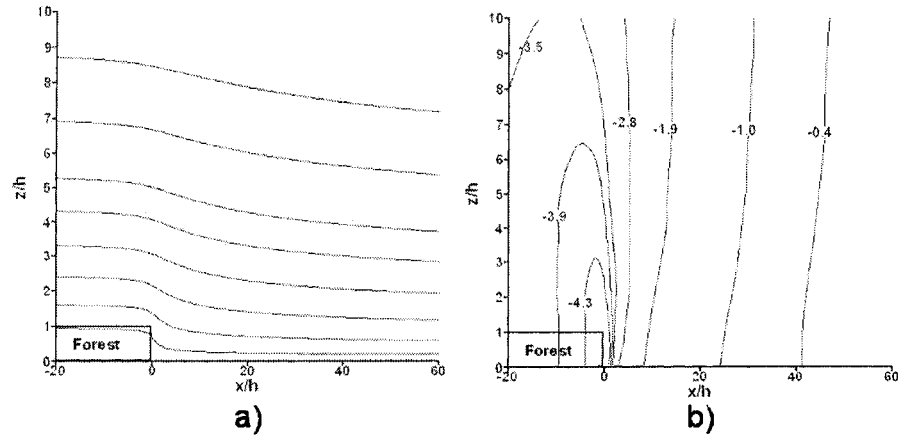


Figure 17 Simulation of the Gash [2] study: a) streamlines and b) computed pressure field (gage pressure in Pascals)

## 2.7 Conclusion

A CFD model using a porous media approach and a modified  $k - \epsilon$  turbulence model was used to simulate wind flow near a forest edge. The proposed method was compared to experimental measurements from three different authors [1, 2, 3]. Two wind directions were analyzed: wind flow entering and wind flow leaving a forest. A one-dimensional model with original boundary conditions was used to obtain the fully developed wind flow over and through the forest. This solution was used as the inlet boundary condition for simulating wind flow leaving the forest. An original boundary condition on the ground within the forest was proposed. Results indicate that the proposed method accurately simulated the wind velocity within and above the forest, but that more work needs to be done to obtain good turbulence intensity predictions. Nevertheless, the results are encouraging and further investigation will be required in order to reach the proposed method's full potential.

## References

- [1] Raynor, G. (1971), *Wind and temperature structure in a coniferous forest and a contiguous field*. For. Sci., vol. 17:pp. 351–363.
- [2] Gash, J.H.C. (1986), *Observations of turbulence downwind of a forest-heath interface*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 36, 3:pp. 227–237.
- [3] Irvine, M.R., Gardiner, B.A., and Hill, M.K. (1997), *The evolution of turbulence across a forest edge*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 84, 3:pp. 467–496.
- [4] Li, Z., Lin, J., and Miller, D. (1990), *Air flow over and through a forest edge: a steady-state numerical simulation*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 51, 1-2:pp. 179–97.
- [5] Liu, J., Chen, J., Black, T., and Novak, M. (1996), *E- $\epsilon$  modelling of turbulent air flow downwind of a model forest edge*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 77, 1:pp. 21–44.
- [6] Jones, W.P. and Launder, B.E. (1972), *The prediction of laminarization with two-equation model of turbulence*. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 15:pp. 301–314.
- [7] Richards, P. and Hoxey, R. (1993), *Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k- $\epsilon$  turbulence model*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 46-47:pp. 145–153.
- [8] Alinot, C. and Masson, C. (2005), *k-epsilon model for the atmospheric boundary layer under various thermal stratifications*. Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME, vol. 127, 4:pp. 438–443.
- [9] Sanz, C. (2003), *A note on k- $\epsilon$  modelling of vegetation canopy air-flows*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 108, 1:pp. 191–197.
- [10] Katul, G.G., Mahrt, L., Poggi, D., and Sanz, C. (2004), *One- and two-equation models for canopy turbulence*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 113, 1:pp. 81–109.
- [11] Liang, L., Xiaofeng, L., Borong, L., and Yingxin, Z. (2006), *Improved k- $\epsilon$  two-equation turbulence model for canopy flow*. Atmospheric Environment, vol. 40, 4:pp. 762–770.
- [12] Pinard, J. (2000), Numerical simulation of wind in plant canopies. Ph.D. thesis, University of Alberta (Canada).
- [13] Katul, G. (1998), *An investigation of higher-order closure models for a forested canopy*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 89, 1:pp. 47–74.
- [14] Katul, G. and Wei-han, C. (1999), *Principal length scales in second-order closure models for canopy turbulence*. Journal of Applied Meteorology, vol. 38, 11:pp. 1631–1643.

- [15] Amiro, B. (1990), *Comparison of turbulence statistics within three boreal forest canopies*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 51:pp. 99–121.
- [16] Marcolla, B., Pitacco, A., and Cescatti, A. (2003), *Canopy architecture and turbulence structure in a coniferous forest*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 108, 1:pp. 39–59.
- [17] Svensson, U. and Haggkvist, K. (1990), *A two-equation turbulence model for canopy flows*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 35, 1-3:pp. 201–211.
- [18] Kobayashi, M., Pereira, J., and Siqueira, M. (1994), *Numerical study of the turbulent flow over and in a model forest on a 2d hill*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 53, 3:pp. 357–374.
- [19] Garratt, J. (1992), *The Atmospheric Boundary Layer*. New York, NY: Cambridge University Press.
- [20] Fluent (1996), *User's guide*.
- [21] Brodeur, P., Masson, C., and Sibuet-Watters, C. (2005), *Numerical simulation of wind distribution over very complex terrain*. In American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA-2006-1362), Reno, Nevada.
- [22] Stull, R.B. (1988), *An introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic publishers.
- [23] Panofsky, H. and Dutton, J. (1984), *Atmospheric Turbulence*. John Wiley and Sons.
- [24] Patankar, S.V. (1980), *Numerical heat transfer and fluid flow*. Series in computational and physical processes in mechanics and thermal sciences., New-York: McGraw-Hill.
- [25] Kaimal, J. (1994), *Atmospheric boundary layer: their structure and measurement*. New-York: Oxford University Press.
- [26] Amiro, B. (1990), *Drag coefficients and turbulence spectra within three boreal forest canopies*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 52:pp. 227–246.
- [27] Poggi, D., Porporato, A., Ridolfi, L., Albertson, J.D., and Katul, G.G. (2004), *The effect of vegetation density on canopy sub-layer turbulence*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 111, 3:pp. 565–587.

### **ANNEXE 3**

## **RECOMMENDED PRACTICES WHEN ANALYZING WIND FLOW NEAR A FOREST EDGE WITH WASP**

Cet article sera présenté à la *conférence européenne sur l'énergie éolienne* qui aura lieu à Milan, Italie, du 7 au 10 mai 2007 et sera inclus dans le compte rendu de la conférence.

### 3.1 Abstract

In recent years, wind prediction models have been used more and more frequently to characterize wind resource. The main advantage of these models is that they require the installation of a minimum number of costly measurement masts. However, they are very sensitive to the position of the measurement masts, especially in the presence of forest. This paper analyzes wind flow predictions obtained from WAsP using different reference masts near a forest edge. The solution dependency on the mast position was analyzed, and results were compared to numerical predictions from a Computational Fluid Dynamics (CFD) model. The model was validated using field measurements from two different authors. The CFD model used a porous media approach combined with a modified  $k - \epsilon$  turbulence model to simulate momentum losses and turbulence generation within the forest. The momentum losses were represented by a drag coefficient and a leaf area density. In WAsP, the forest was represented by a roughness length and a displacement height that was calculated using the forest height. Two wind directions were analyzed: wind flow entering and wind flow leaving the forest. Results indicated that, to obtain acceptable results from WAsP, the measurement mast should be located outside the forest. If this is not possible, it should be located at an altitude greater than five times the forest height.

### 3.2 Introduction

Recently, much attention has been focused on wind flow near and within forested areas [1, 2, 3, 4, 5]. This is particularly true for the wind energy industry, since accurate wind flow predictions are essential to obtain accurate site assessments. The difficulties associated with the prediction of wind flow in forested areas are related to the significant wind velocity reduction. Through the years, WAsP [6], developed by the Risoe National Laboratory, imposed itself as the wind industry standard tool in site assessment. One important parameter in WAsP is the position of the meteorological station (met. station). The present study considers the dependency of WAsP's predictions to the position of the met. station when analyzing wind flow in the neighboring of a forest edge. In the literature, experi-

mental studies analyzing wind flow near a forest edge are very limited. In 1971, Raynor [7] obtained wind velocity measurements for wind flow leaving and entering a pine forest 10.5 m high. This study did not provide wind velocity measurements above 14 m and did not give the leaf area density of the forest nor the roughness of the ground outside the forest. In 1986, Gash [8] made measurements near a Scots pine forest 9.8 m high, and obtained wind velocity measurements at only one height on five different masts for two directions: wind flow entering and wind flow leaving the forest. The roughness of the ground outside the forest was given, but no information about the leaf area density of the forest was given. Finally, in 1997, Irvine et al. [9] made wind velocity measurements near a 7.5 m high Sitka spruce forest. Measurements were obtained only for wind flow entering the forest below 15 m. The leaf area index (LAI) of the forest and the roughness of the ground outside the forest were given. Since no experimental study gave measurements at altitudes between 50 and 100 m near a forest edge, a CFD model was used to obtain precise predictions of the wind flow at high altitude. The CFD predictions were then used as a reference for comparison with WAsP. The first objective of this study was to evaluate the influence of the met. station position on the predicted wind flow obtained with WAsP. The second objective was to compare WAsP to experimental measurements at low altitude, and CFD simulations at high altitude, for wind flow entering and wind flow leaving a forest.

### **3.3 Experimental measurements**

The experimental measurements were obtained from two different studies [7, 9]. The first study (Irvine et al. [9]) was used to obtain experimental measurements for wind flow entering a forest. The second study (Raynor [7]) was used to obtain experimental results for wind flow leaving a forest.

#### **3.3.1 The Irvine et al. [9] experiment**

Velocity measurements were obtained across a transition from a moorland to a uniform plantation of Sitka spruce during either neutral or slightly unstable conditions. The average tree height ( $h$ ) was 7.5 m and the site was very flat. Outside the forest, the ground was almost entirely composed of rough pasture ( $z_o = 0.0028$  m). Irvine et al. [9] estimated the leaf area index (LAI) of the forest to be 2.15. Since no information was given about the



leaf area density ( $\alpha$ ) distribution, the leaf area density distribution presented in Fig. 1 was assumed. This distribution was chosen to get a best fit between experimental data and the CFD simulations. The relation between the leaf area density ( $\alpha$ ) and the leaf area index (LAI) is given by:

$$LAI = \int_0^h \alpha dz \quad (3.1)$$

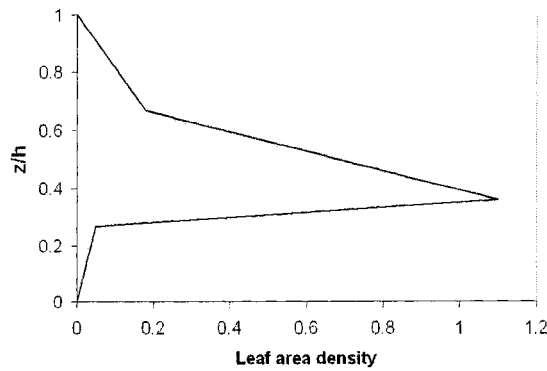


Figure 1 Assumed leaf area density distribution for the Irvine et al. [9] study

Measurements were obtained at four 15 m high triangular lattice towers:

- Mast 1:  $6.1h$  upwind of the forest edge;
- Mast 2: at the forest edge;
- Mast 3:  $3.6h$  downwind of the forest edge;
- Mast 4:  $14.5h$  downwind of the forest edge.

### 3.3.2 The Raynor [7] experiment

Wind velocity measurements were obtained on a flat terrain near a transition from a 10.5 m high pine forest to an open field covered with grass, weeds and low brush. Following this description of the open field, the open field roughness ( $z_o$ ) was assumed to be 0.1 m, since it was not given in Raynor's study. No information about the leaf area density ( $\alpha$ )

distribution of the forest was given, so a leaf area density distribution that allowed a best fit between the CFD simulations and the experimental measurements was assumed (see Figure 2).

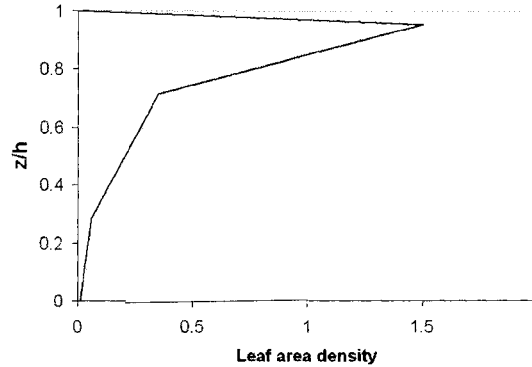


Figure 2 Assumed leaf area density distribution for the Raynor [7] study

Velocity measurements were obtained using five 14 m high triangular steel towers:

- Mast 1:  $9.52h$  upwind of the forest edge;
- Mast 2:  $5.71h$  upwind of the forest edge;
- Mast 3:  $1.9h$  upwind of the forest edge;
- Mast 4: at the forest edge;
- Mast 5:  $3.81h$  downwind of the forest edge.

### 3.4 CFD simulations

Since the experimental measurements available in the literature did not provide measurements at altitudes higher than  $z/h=2$ , it was necessary to use a CFD model to obtain an accurate prediction of the wind flow at high altitude. The accuracy of the CFD model presented in this paper has been demonstrated by Dalpé and Masson in a previous study [10]. A review of the mathematical model and numerical method is presented in this section.

### 3.4.1 Mathematical model

The model used the simplified equations for a neutrally stratified, steady state and incompressible surface layer flow within and above a horizontally homogeneous forest. The continuity and momentum equations were written as follows:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.2)$$

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u'_i u'_j}) + S_{u,i}. \quad (3.3)$$

$$S_{u,i} = -\rho C_D \alpha |u| u_i \quad (3.4)$$

where

- $S_{u,i}$  represents the viscous and drag forces generated by the forest in the  $i$  direction;
- $\rho$  is the air density;
- $C_D$  is the drag coefficient of the forest;
- $\alpha$  is the leaf area density;
- $|u|$  is the wind velocity magnitude;
- $u_i$  is the wind velocity in the  $i$  direction.

Since no information was given about the drag coefficient ( $C_D$ ) in neither of the studies simulated [7, 9], it was set at 0.2, as suggested by Katul [11].

A modified  $k - \epsilon$  turbulence model was used to represent the turbulent fluxes. To do so, the modified  $k - \epsilon$  model used the Boussinesq hypothesis and a turbulent viscosity ( $\mu_t$ ):

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.5)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.6)$$

To represent the generation and the dissipation of turbulence within the forest, source terms were added to the  $k$  and  $\epsilon$  equations [2]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon + S_k \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (3.8)$$

$$G_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3.9)$$

$$S_k = \rho C_D \alpha [\beta_p |u|^3 - \beta_d k |u|] \quad (3.10)$$

$$S_\epsilon = \rho C_D \alpha \frac{\epsilon}{k} [C_{\epsilon 4} \beta_p |u|^3 - C_{\epsilon 5} \beta_d k |u|] \quad (3.11)$$

where  $|u|$  is the magnitude of the velocity and  $C_\mu$ ,  $C_{\epsilon 1}$ ,  $C_{\epsilon 2}$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\epsilon$ ,  $C_{\epsilon 4}$ ,  $C_{\epsilon 5}$ ,  $\beta_p$  and  $\beta_d$  are model constants. In order to adapt the standard  $k - \epsilon$  turbulence model to the atmospheric surface layer, the original constants of Jones and Launder [12] (Table 1) were modified. Following the approach of Katul et al. [2], the neutral surface layer ratios of standard deviations of velocity components to friction velocity [13] (Table 2) were used to evaluate the model constants.

$$C_\mu = \frac{1}{\left( 0.5 \left[ \left( \frac{\sigma_u}{u_*} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_v}{u_*} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_w}{u_*} \right)^2 \right] \right)^2} = 0.03 \quad (3.12)$$

$C_\mu$	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

Table I

Original constants of the  $k - \epsilon$  turbulence model

$\sigma_u/u_*$	$\sigma_v/u_*$	$\sigma_w/u_*$
2.4	2.1	1.25

Table II

Neutral surface layer ratios of standard deviations of velocity components to friction velocity

$$\sigma_\epsilon = \frac{K^2}{\sqrt{C_\mu} (C_{\epsilon 2} - C_{\epsilon 1})} = 2.12 \quad (3.13)$$

where  $K$  is the von Karman constant ( $K=0.42$ ).

Following the recommendations of Kobayashi et al. [14] and Liu et al. [15],  $\beta_p = 1$  was used to evaluate  $\beta_d$ ,  $C_{\epsilon 4}$  and  $C_{\epsilon 5}$  using the equations of Sanz [16]:

$$\beta_d = \sqrt{C_\mu} \left( \frac{2}{0.05} \right)^{2/3} \beta_p + \frac{3}{\sigma_k} = 5.03 \quad (3.14)$$

$$C_{\epsilon 4} = C_{\epsilon 5} = \sigma_k \left[ \frac{2}{\sigma_\epsilon} - \frac{\sqrt{C_\mu}}{6} \left( \frac{2}{0.05} \right)^{2/3} (C_{\epsilon 2} - C_{\epsilon 1}) \right] = 0.78 \quad (3.15)$$

Table 3 presents a summary of the constants used in the modified  $k - \epsilon$  turbulence model. Note that these constants are slightly different from those used by Katul et al. [2].

$C_\mu$	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$	$C_{\epsilon 4}$	$C_{\epsilon 5}$	$\beta_p$	$\beta_d$
0.03	1.44	1.92	1.0	2.12	0.78	0.78	1.0	5.03

Table III

Turbulence constants for the modified  $k - \epsilon$  turbulence model

### 3.4.2 Numerical Method

The commercial software FLUENT 6.2 [17] was used to solve the mathematical model presented in section 3.4.1. FLUENT 6.2 uses a control-volume-based technique to convert the governing equations to algebraic equations that can be solved numerically. In this paper, the SIMPLEC pressure-velocity coupling method, the PRESTO pressure interpolation scheme and the QUICK interpolation scheme were used.

Computations were performed on a two-dimensional  $x - z$  domain which was 800 m high and 1000 m long (see Figures 3.4.2a and 3.4.2b). The forest edge was located 300 m from the inlet for both simulations (wind flow entering and wind flow leaving the forest). It was necessary to use a domain 800 m high in order to minimize the effect of the upper boundary on the solution. The domain was divided into 199 ( $x$ -direction) and 102 ( $z$ -direction) non-uniform rectangular grids. The shortest distance between horizontal grid points was used at the forest edge ( $\Delta x = 2.5$  m). Grid size increased moving away from the forest edge up to  $\Delta x = 7$  m at the inlet and  $\Delta x = 20$  m at the outlet. The shortest distance between vertical grid points was used at the ground ( $\Delta z = 0.2$  m). Grid size increased with altitude up to  $\Delta z = 50$  m at the top of the domain. The domain contained a total of 20,298 control volumes. Using this calculation grid, a domain independent and grid independent solution was obtained.

#### 3.4.2.1 Boundary conditions (wind flow entering the forest)

At the **inlet and top boundaries**, the logarithmic wind profile [18] and the turbulence quantities as proposed by Panofsky and Dutton [19] were imposed (see Eq. (3.16) to (3.18)). These equations represent the analytical solution of the conservation equations

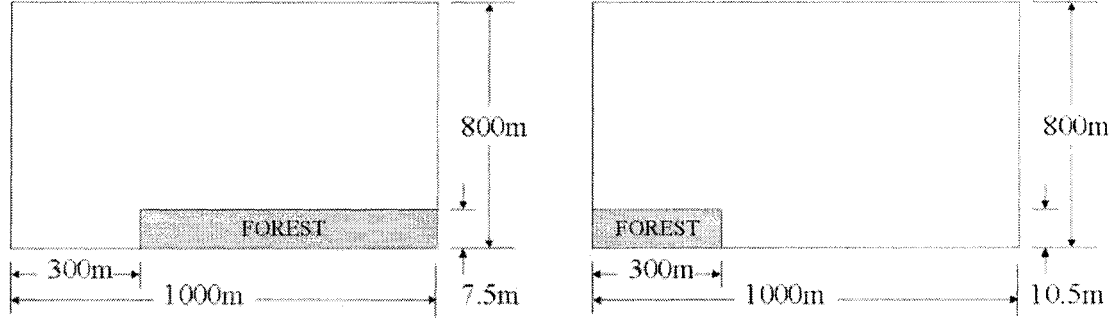


Figure 3 Calculation domain for wind flow a) entering the forest and b) leaving the forest

for fully developed wind flow on a flat terrain described by a roughness length ( $z_o$ ).

$$u = \frac{u_*}{K} \ln \left( \frac{z}{z_o} \right) \quad (3.16)$$

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (3.17)$$

$$\epsilon = \frac{u_*^3}{Kz} \quad (3.18)$$

where  $z_o$  is the roughness of the ground upwind of the forest. The friction velocity ( $u_*$ ) was calculated using the velocity imposed at the top of the domain ( $u_{top}$ ), and the height of the domain ( $z_{top}$ ):

$$u_* = \frac{K u_{top}}{\ln \left( \frac{z_{top}}{z_o} \right)} \quad (3.19)$$

At the **outlet boundary**, Patankar's [20] outflow condition was used.

On the **ground outside the forest**, the approach of Richards and Hoxey [21] was used. Using this approach, the wind flow below  $z_o$  was not modeled, and the computational domain had its bottom boundary at a height  $z = z_o$  (Figure 4).

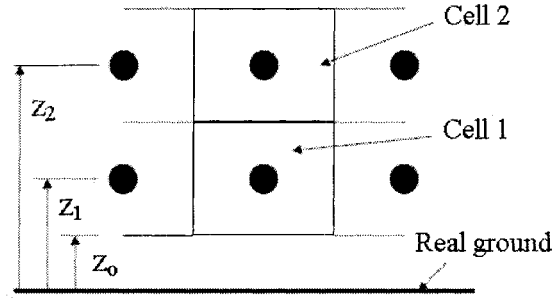


Figure 4 First two rows of cells near the ground

Using the velocity ( $u_2$ ) and the height ( $z_2$ ) of the centroid of Cell 2, a local friction velocity ( $u_{*,l}$ ) was defined:

$$u_{*,l} = \frac{u_2 K}{\ln \left( \frac{z_2}{z_0} \right)} \quad (3.20)$$

Using  $u_{*,l}$ , the logarithmic wind profile [18] and the turbulence quantities, as proposed by Panofsky and Dutton [19], the velocity ( $u_1$ ), the turbulent kinetic energy ( $k_1$ ) and the turbulent kinetic energy dissipation rate ( $\epsilon_1$ ) at the centroid of Cell 1 were calculated:

$$u_1 = \frac{u_{*,l}}{K} \ln \left( \frac{z_1}{z_0} \right) \quad (3.21)$$

$$k_1 = \frac{u_{*,l}^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (3.22)$$

$$\epsilon_1 = \frac{u_{*,l}^3}{K z_1} \quad (3.23)$$

This was an iterative process since a new value of  $u_{*,l}$  was calculated at every iteration. This procedure was created using user-defined functions (UDF) in FLUENT 6.2.

On the **ground within the forest**, a transition function that made a transition from the roughness length boundary condition upstream of the edge to a full slip wall boundary condition deep within the forest was used. Velocity and turbulence quantities at Cell 1 were calculated as follows:

$$u_1 = f u_{z_0} + (1 - f) u_{fs} \quad (3.24)$$



$$k_1 = f k_{z_o} + (1 - f) k_{fs} \quad (3.25)$$

$$\epsilon_1 = f \epsilon_{z_o} + (1 - f) \epsilon_{fs} \quad (3.26)$$

where  $f$  was the transition coefficient:

$$f = \begin{cases} 0 & u_{*,l} \leq 0 \\ \frac{u_{*,l}}{u_{*,l,edge}} & 0 < u_{*,l} < u_{*,l,edge} \\ 1 & u_{*,l} \geq u_{*,l,edge} \end{cases} \quad (3.27)$$

$u_{*,l}$  was calculated using equation (3.20) and  $u_{*,l,edge}$  was the value of  $u_{*,l}$  at the forest edge.  $u_{z_o}$ ,  $k_{z_o}$  and  $\epsilon_{z_o}$  were calculated using the logarithmic wind profile [18] and the turbulence quantities as proposed by Panofsky and Dutton [19] using the roughness length ( $z_o$ ) outside the forest:

$$u_{z_o} = \frac{u_{*,l}}{K} \ln \left( \frac{z_1}{z_o} \right) \quad (3.28)$$

$$k_{z_o} = \frac{u_{*,l}^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (3.29)$$

$$\epsilon_{z_o} = \frac{u_{*,l}^3}{K z_1} \quad (3.30)$$

$u_{fs}$ ,  $k_{fs}$  and  $\epsilon_{fs}$  were calculated using a full slip boundary condition:

$$u_{fs} = u_2 \quad (3.31)$$

$$k_{fs} = k_2 \quad (3.32)$$

$$\epsilon_{fs} = \epsilon_2 \quad (3.33)$$

#### 3.4.2.2 Boundary conditions (wind flow leaving the forest)

At the **outlet boundary**, the outflow condition defined by Patankar [20] was imposed. On the **ground outside the forest** and on the **ground within the forest**, the boundary conditions were the same as for the wind flow entering the forest (see section 3.4.2.1).

At the **inlet and top boundaries**, the fully developed wind flow obtained from the solution of a one-dimensional model in FLUENT 6.2 was imposed. In the past, empirical solutions have been proposed by various authors [19, 22, 23, 24]. These solutions were not used here as the inlet boundary condition, since they are not solutions to the proposed mathematical model. For this reason, it was chosen to use a fully developed solution, obtained using the proposed method, as the inlet boundary condition of the two-dimensional problem. The calculation domain was 1 m wide and 800 m high, and was composed of only one column of cells. The domain was divided into 172 non-uniform rectangular grids with the shortest distance between the grid points at the ground ( $\Delta z = 0.07$  m). Grid size increased with altitude up to  $\Delta z = 50$  m near the top of the domain. This calculation grid generated a grid independent and domain independent solution. In this one-dimensional model, only two boundary conditions were required: the ground boundary and the top boundary. At the **ground boundary**, a full slip condition was used since the shear stress on the ground is negligible for dense forests [2]. A dense forest is defined as a forest where the shear stress near the ground is small compared to the local drag force generated by the forest [2, 25].

At the **top boundary**, the velocity  $u_n$  was prescribed according to the method proposed by Dalpé and Masson [10]. The turbulent kinetic energy ( $k_n$ ) and the dissipation rate of turbulent kinetic energy ( $\epsilon_n$ ) were then calculated using a friction velocity ( $u_{*,fd}$ ) defined using the velocities at the centroid of the two cells adjacent to the top boundary ( $u_n$  and  $u_{n-1}$ ) (see Fig. 5).  $u_n$  was prescribed, while  $u_{n-1}$  was the value at the centroid of the second-to-last cell adjacent to the top boundary, and obtained from the previous iteration. Iterations were done until a converged value of  $u_{n-1}$  was obtained.  $u_{*,fd}$  was calculated at every iteration using Eq. (3.34).

$$u_{*,fd} = \frac{(u_n - u_{n-1}) K}{\ln(z_n/z_{n-1})} \quad (3.34)$$

Using this friction velocity,  $k_n$  and  $\epsilon_n$  were prescribed using the equations proposed by Panofsky and Dutton [19]:

$$k_n = \frac{u_{*,fd}^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (3.35)$$

$$\epsilon_n = \frac{u_{*,fd}^3}{K z_n} \quad (3.36)$$

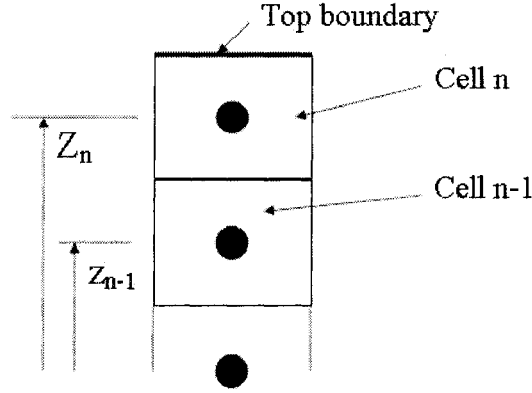


Figure 5 Two cells at the top of the domain

### 3.5 WAsP

To represent the effect of the forest on the wind flow, the approach proposed by the Risoe National Laboratory was used [26]. This approach suggested to raise the elevation of the ground a height equivalent to the displacement height ( $d$ ) of the forest. This is equivalent to approximately 65 to 75% the forest height [6, 13, 22, 24]. A value of  $d = 0.65h$  was used in this paper. To have a more realistic solution near the forest edge, the edge was tapered up to a distance equivalent to five times the displacement height as showed in Figure 6. The roughness length was 10 % the forest height ( $z_o = 0.1h$ ) [6, 24]. In WAsP, the position of the meteorological station (met. station) was varied in order to analyze the solution dependency on this parameter. For each direction, wind flow entering and wind flow leaving the forest, nine different met. stations were analyzed (see Figure 3.5). The met. stations were positioned at the same  $x$ -position as the measurement masts where the experimental measurements were obtained (see Section 3.3). The  $z$ -positions of the met. stations were set to three different heights within the range of interest for wind energy applications. The wind velocity probability function matched a perfect Weibull fit with an average wind velocity equal to the one obtained from CFD simulations. To simulate a neutral atmosphere, all heat fluxes were set to zero.

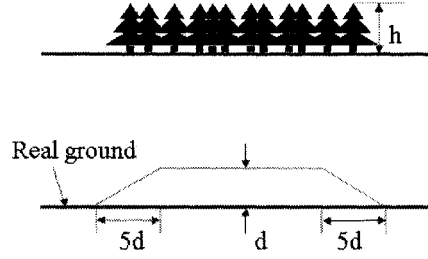


Figure 6 Forest representation in WAsP

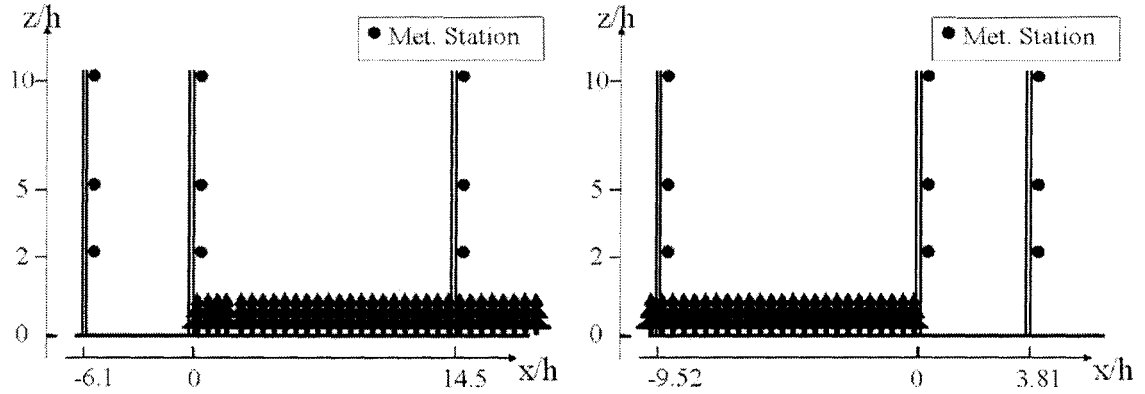


Figure 7 Meteorological stations for wind flow a) entering the forest and b) leaving the forest

### 3.6 Results

The wind velocity results are presented in dimensionless form, as the ratio of the predicted velocity over a reference velocity ( $u_{ref}$ ). The results are presented up to a height equal to 10 times the forest height in order to evaluate the difference between WAsP and the proposed CFD model at heights of interest for wind energy applications. For the wind flow entering the forest, the reference velocity ( $u_{ref}$ ) was taken to be the velocity measured by Irvine et al. [9] at height  $z/h = 2$  on Mast 1 ( $u_{ref}=6.28$  m/s). For the wind flow leaving the forest, the reference velocity ( $u_{ref}$ ) was taken to be the velocity measured by Raynor [7] at a height  $z/h = 1.33$  on Mast 1 ( $u_{ref}=2.98$  m/s). The coordinate system used to present the result is such that the edge is located at  $x/h = 0$ . The least square method was

used to obtain an indication of the general accuracy of WAsP. For the wind flow entering the forest, the sum of the square of the offsets ( $R^2$ ) was calculated using the results from CFD and WAsP at  $x/h = -6.1, 0, 3.6$  and  $14.5$ . For the wind flow leaving the forest,  $R^2$  was calculated using the CFD and WAsP results at  $x/h = -9.52, -5.71, -1.9, 0$  and  $3.81$ . The best and worst fit between WAsP and CFD simulations were chosen as those which minimized and maximized  $R^2$ , respectively (see Fig. 8 and 9). However, for the wind energy industry, it is the accuracy of the predictions at the hub height that is critical. To get a measure of the accuracy of WAsP at the hub height, the average relative errors between WAsP and CFD simulations were obtained (Table 4 and 5). The hub height was assumed to be at  $z/h = 8$ .

### 3.6.1 Wind flow entering the forest

From the results obtained (Figures 8a to 8d), it is clear that the met. station position has a significant impact on the wind flow predicted by WAsP. Among the nine met. stations analyzed, a best fit was obtained with the met. station located at the forest edge ( $x/h = 0$ ) at  $z/h = 5$ , while a worst fit was obtained with the met. station located deep within the forest ( $x/h = 14.5$ ) at  $z/h = 2$ . When considering the average relative errors at  $z/h = 8$  (Table 4), it is not clear which met. station gives better results. However, it is clear that the worst results were obtained with the met. station located deep within the forest ( $x/h = 14.5$ ) at  $z/h = 2$ . Positioning the met. station at  $x/h = 14.5$  and  $z/h = 2$  resulted in a dramatic underestimation of the wind velocity at high altitude. Looking at Figures 8c and 8d, it is clear that WAsP does not accurately simulate the wind flow at low altitude. This behavior of WAsP near the ground was expected, since WAsP was developed to simulate relatively flat terrain characterized by small roughness lengths. This is not the case here since the ground was elevated a height equivalent to the displacement height ( $d = 4.875$  m) and the roughness length of the forest was set to  $0.75$  m.

### 3.6.2 Wind flow leaving the forest

Among the nine met. stations analyzed, a best fit was obtained with the met. station located within the forest ( $x/h = -9.52$ ) at  $z/h = 5$ , and a worst fit was obtained with the met. station also located within the forest ( $x/h = -9.52$ ) but at  $z/h = 2$ . In the latter, WAsP signif-

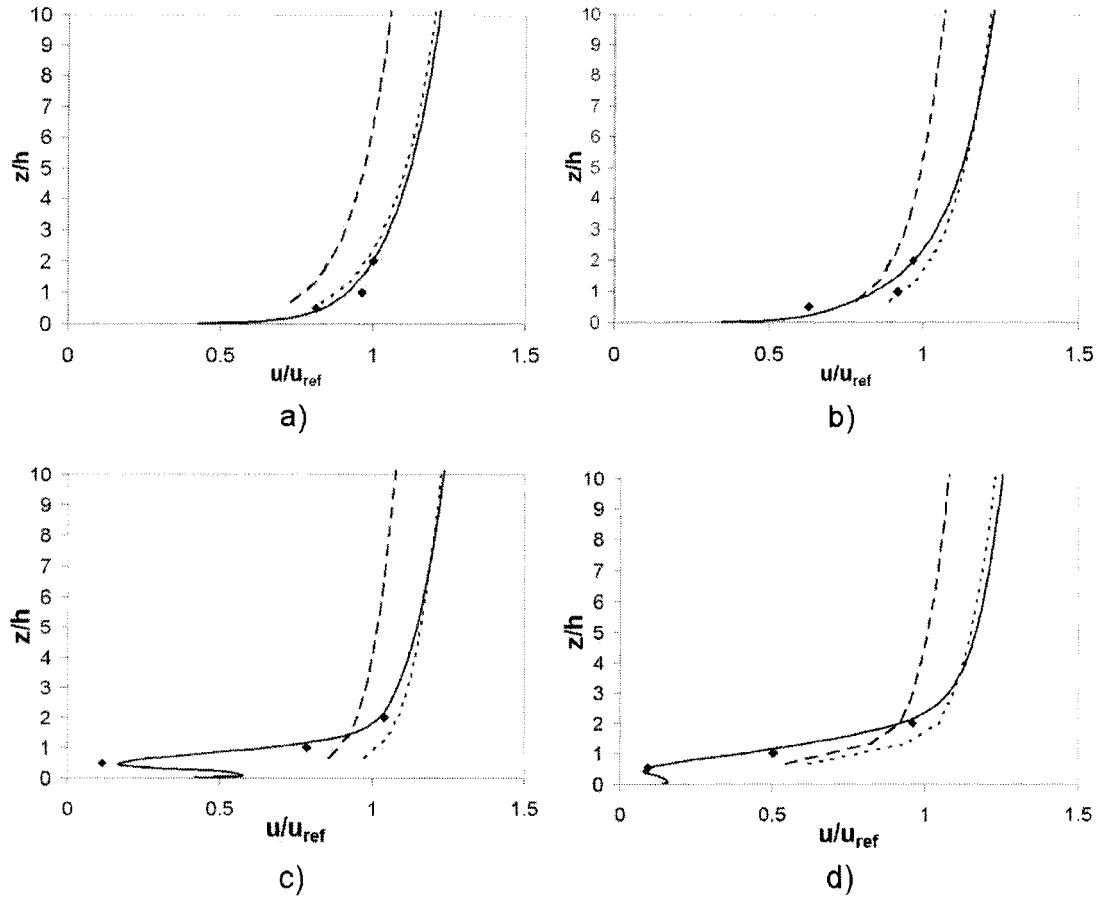


Figure 8 Wind flow entering the forest: comparison between experimental measurements (diamond), CFD simulation (solid line), WAsP best fit (dotted line) and WAsP worst fit (dashed line) for a) Mast 1 ( $x/h = -6.1$ ), b) Mast 2 ( $x/h = 0$ ), c) Mast 3 ( $x/h = 3.6$ ) and d) Mast 4 ( $x/h = 14.5$ )

icantly underestimated the wind velocity at high altitude with an average relative error of 20.42% (Table 5). This underestimation of the wind velocity was caused by the underestimation of the wind shear generated by the forest. Over the forest, WAsP assumed that the wind profile followed a logarithmic profile even at low altitude. Figures 9a to 9d show that the wind profiles obtained using the CFD simulation are far from logarithmic at low altitude. Knowing this, it is not surprising that the predictions obtained with met. stations located at  $z/h = 2$  over the forest are not accurate.

		x/h		
		-6.1	0	14.5
z/h	2	2.06	5.44	13.10
	5	0.64	0.94	0.63
	10	0.63	0.63	1.32

Table IV

Wind flow entering the forest: average relative errors (%) at  $z/h=8$  for the nine met. stations analyzed

		x/h		
		-9.52	0	3.81
z/h	2	20.42	9.27	3.32
	5	4.79	0.69	0.65
	10	2.08	3.61	3.38

Table V

Wind flow leaving the forest: average relative errors (%) at  $z/h=8$  for the nine met. stations analyzed

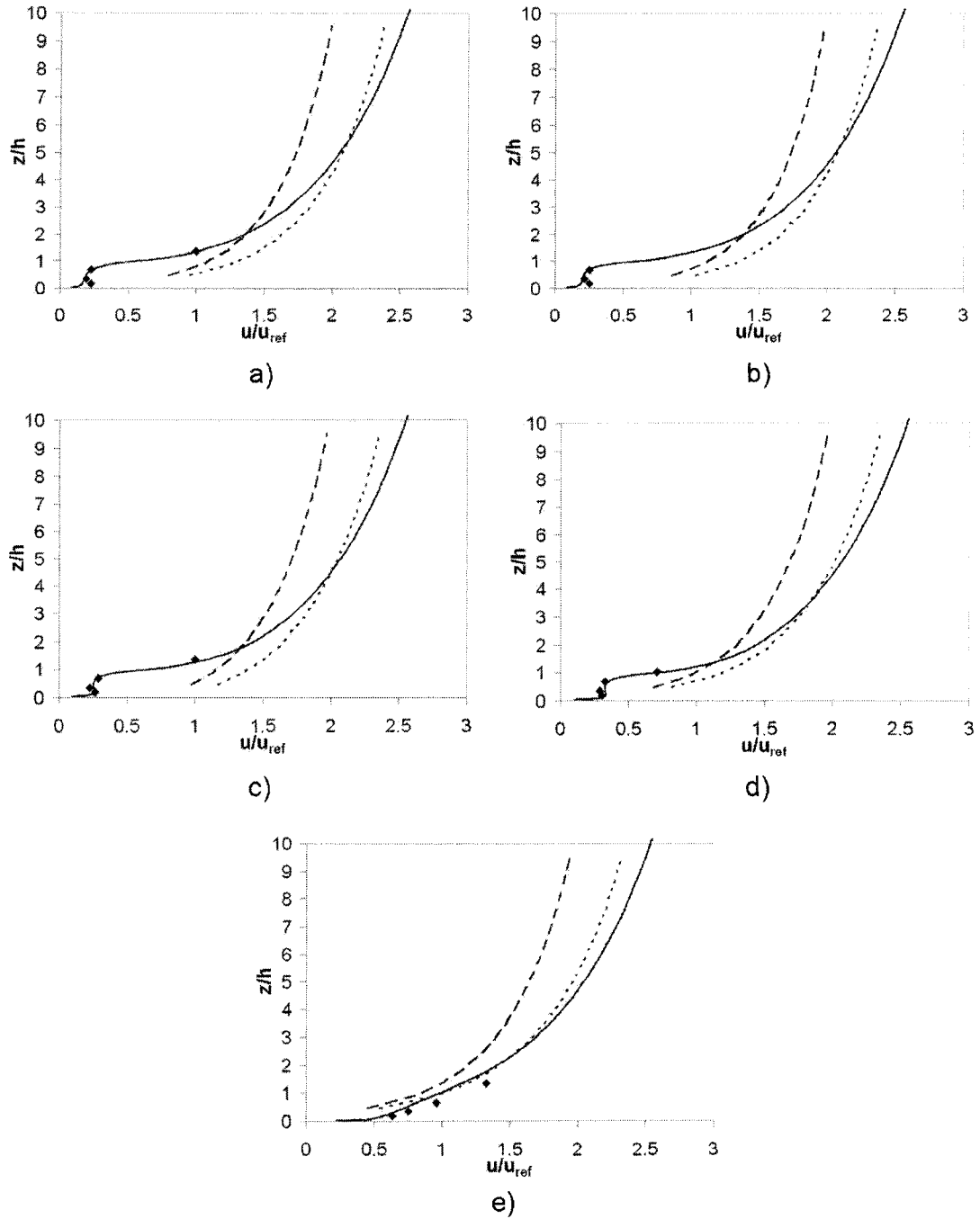


Figure 9 Wind flow leaving the forest: comparison between experimental measurements (diamond), CFD simulation (solid line), WASP best fit (dotted line) and WASP worst fit (dashed line) for a) Mast 1 ( $x/h = -9.52$ ), b) Mast 2 ( $x/h = -5.71$ ), c) Mast 3 ( $x/h = -1.9$ ), d) Mast 4 ( $x/h = 0$ ) and e) Mast 5 ( $x/h = 3.81$ )



### 3.7 Conclusion

A CFD model and experimental measurements from two different authors [7, 9] were used to analyze the influence of the meteorological station position on WASP's predictions for wind flow entering and wind flow leaving a forest. For each wind direction, nine different meteorological stations were analyzed. For the wind flow entering the forest, a 7.5 m high Sitka spruce forest was considered, while for the wind flow leaving the forest, a 10.5 m high pine forest was considered. The CFD model used a porous media approach combined with a modified  $k - \epsilon$  turbulence model to simulate momentum losses and turbulence generation within the forest. Results indicate that, to avoid a significant underestimation of the wind velocity at typical hub height, the meteorological station should be located outside the forest or five times above the forest height over the forest. Failing to do so could result in wind velocity errors up to 20%.

## References

- [1] Chantelot, A., Delaunay, D., Clarenc, T., and Koulibaly, D. (2006), *Wind resource assessment in forested and complex terrain*. In European wind energy conference, Athens, Greece.
- [2] Katul, G.G., Mahrt, L., Poggi, D., and Sanz, C. (2004), *One- and two-equation models for canopy turbulence*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 113, 1:pp. 81–109.
- [3] Lalic, B., Mihailovic, D.T., Rajkovic, B., Arsenic, I., and Radlovic, D. (2003), *Wind profile within the forest canopy and in the transition layer above it*. Environmental Modelling and Software, vol. 18, 10:p. 943.
- [4] Liang, L., Xiaofeng, L., Borong, L., and Yingxin, Z. (2006), *Improved  $k-\epsilon$  two-equation turbulence model for canopy flow*. Atmospheric Environment, vol. 40, 4:pp. 762–770.
- [5] Yang, B. (2003), Large eddy simulation of turbulent flow across a forest edge. Ph.d., University of California, Davis.
- [6] Troen and Petersen, E. (1989), European Wind Atlas. Roskilde, Denmark: Riso National Laboratory.
- [7] Raynor, G. (1971), *Wind and temperature structure in a coniferous forest and a contiguous field*. For. Sci., vol. 17:pp. 351–363.
- [8] Gash, J.H.C. (1986), *Observations of turbulence downwind of a forest-heath interface*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 36, 3:pp. 227–237.
- [9] Irvine, M.R., Gardiner, B.A., and Hill, M.K. (1997), *The evolution of turbulence across a forest edge*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 84, 3:pp. 467–496.
- [10] Dalpé, B. and Masson, C. (2006), *Numerical simulation of wind flow near a forest edge*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics (Submitted December 1st).
- [11] Katul, G. (1998), *An investigation of higher-order closure models for a forested canopy*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 89, 1:pp. 47–74.
- [12] Jones, W.P. and Launder, B.E. (1972), *The prediction of laminarization with two-equation model of turbulence*. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 15:pp. 301–314.
- [13] Garratt, J. (1992), The Atmospheric Boundary Layer. New York, NY: Cambridge University Press.
- [14] Kobayashi, M., Pereira, J., and Siqueira, M. (1994), *Numerical study of the turbulent flow over and in a model forest on a 2d hill*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 53, 3:pp. 357–374.

- [15] Liu, J., Chen, J., Black, T., and Novak, M. (1996), *E- $\epsilon$  modelling of turbulent air flow downwind of a model forest edge*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 77, 1:pp. 21–44.
- [16] Sanz, C. (2003), *A note on k-e modelling of vegetation canopy air-flows*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 108, 1:pp. 191–197.
- [17] Fluent (1996), *User's guide*.
- [18] Stull, R.B. (1988), *An introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic publishers.
- [19] Panofsky, H. and Dutton, J. (1984), *Atmospheric Turbulence*. John Wiley and Sons.
- [20] Patankar, S.V. (1980), *Numerical heat transfer and fluid flow*. Series in computational and physical processes in mechanics and thermal sciences., New-York: McGraw-Hill.
- [21] Richards, P. and Hoxey, R. (1993), *Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k-e turbulence model*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 46-47:pp. 145–153.
- [22] Kaimal, J. (1994), *Atmospheric boundary layer: their structure and measurement*. New-York: Oxford University Press.
- [23] Amiro, B. (1990), *Drag coefficients and turbulence spectra within three boreal forest canopies*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 52:pp. 227–246.
- [24] Pinard, J. (2000), *Numerical simulation of wind in plant canopies*. Ph.D. thesis, University of Alberta (Canada).
- [25] Poggi, D., Porporato, A., Ridolfi, L., Albertson, J.D., and Katul, G.G. (2004), *The effect of vegetation density on canopy sub-layer turbulence*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 111, 3:pp. 565–587.
- [26] Dellwik, E., Jensen, N., and Landberg, L. (2004), *Winds and forests - general recommendations for using wasp*. In BWEA/RES tree workshop, Glasgow (GB).

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Irvine, M.R., Gardiner, B.A., and Hill, M.K. (1997), *The evolution of turbulence across a forest edge*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 84, 3:pp. 467–496.
- [2] Raynor, G. (1971), *Wind and temperature structure in a coniferous forest and a contiguous field*. For. Sci., vol. 17:pp. 351–363.
- [3] Gash, J.H.C. (1986), *Observations of turbulence downwind of a forest-heath interface*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 36, 3:pp. 227–237.
- [4] CANWEA (2006), [www.canwea.ca](http://www.canwea.ca).
- [5] WAsP (2006), [www.wasp.dk](http://www.wasp.dk).
- [6] WindPRO (2006), [www.windpro.com](http://www.windpro.com).
- [7] Windsim (2006), [www.windsim.com](http://www.windsim.com).
- [8] Manwell, J., McGowan, J., and Rogers, A. (2002), *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. Wiley edn.
- [9] Stull, R.B. (1988), *An introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic publishers.
- [10] Panofsky, H. and Dutton, J. (1984), *Atmospheric Turbulence*. John Wiley and Sons.
- [11] Kaimal, J. (1994), *Atmospheric boundary layer: their structure and measurement*. New-York: Oskord University Press.
- [12] Pinard, J. (2000), *Numerical simulation of wind in plant canopies*. Ph.D. thesis, University of Alberta (Canada).
- [13] Garratt, J. (1992), *The Atmospheric Boundary Layer*. New York, NY: Cambridge University Press.
- [14] Massman, W.J. (1997), *An analytical one-dimensional model of momentum transfer by vegetation of arbitrary structure*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 83, 3:pp. 407–421.
- [15] Yang, R. and Friedl, M.A. (2003), *Determination of roughness lengths for heat and momentum over boreal forests*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 107, 3:pp. 581–603.
- [16] Lalic, B., Mihailovic, D.T., Rajkovic, B., Arsenic, I., and Radlovic, D. (2003), *Wind profile within the forest canopy and in the transition layer above it*. Environmental Modelling and Software, vol. 18, 10:p. 943.
- [17] Amiro, B. (1990), *Drag coefficients and turbulence spectra within three boreal forest canopies*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 52:pp. 227–246.

- [18] Cionco, R. (1978), *Analysis of canopy index values for various canopy densities*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 15:pp. 81–93.
- [19] Meyers, T. and Baldocchi, D. (1990), *The budgets of turbulent kinetic energy and reynolds stress within and above a deciduous forest*. Agricultural and forest meteorology, vol. 53:pp. 207–222.
- [20] Amiro, B. (1990), *Comparison of turbulence statistics within three boreal forest canopies*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 51:pp. 99–121.
- [21] Svensson, U. and Haggkvist, K. (1990), *A two-equation turbulence model for canopy flows*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 35, 1-3:pp. 201–211.
- [22] Gardiner, B.A. (1994), *Wind and wind forces in a plantation spruce forest*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 67, 1 - 2:pp. 161–186.
- [23] Kelliher, F.M., Lloyd, J., Arneth, A., Byers, J.N., McSeveny, T.M., Milukova, I., Grigoriev, S., Panfyorov, M., Sogatchev, A., and Varlargin, A. (1998), *Evaporation from a central siberian pine forest*. Journal of Hydrology, vol. 205, 3-4:pp. 279–296.
- [24] Katul, G. (1998), *An investigation of higher-order closure models for a forested canopy*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 89, 1:pp. 47–74.
- [25] Liu, J., Chen, J., Black, T., and Novak, M. (1996), *E- $\epsilon$  modelling of turbulent air flow downwind of a model forest edge*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 77, 1:pp. 21–44.
- [26] Fluent (2006), [www.fluent.com](http://www.fluent.com).
- [27] Troen and Petersen, E. (1989), *European Wind Atlas*. Roskilde, Denmark: Riso National Laboratory.
- [28] Troen, I. and de Baas, A. (1986), *A spectral diagnostic model for wind flow simulation in complex terrain*. In European Wind Energy Association Conference and Exhibition, Rome, pp. 243–249.
- [29] Walmsley, J., Salmon, J., and Taylor, P. (1982), *On the application of a model of boundary-layer flow over low hills to real terrain*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 23:pp. 17–46.
- [30] Cabezón, D., Iniesta, A., Ferrer, E., and Martí, I. (2005), *Comparing linear and nonlinear wind flow models*. In Euromech Colloquium 464b on Wind Energy, Carl von Ossietzky University, Oldenburg (Germany).
- [31] Dellwik, E., Jensen, N., and Landberg, L. (2004), *Winds and forests - general recommendations for using wasp*. In BWEA/RES tree workshop, Glasgow (GB).
- [32] Dellwik, E., Landberg, L., and Jensen, N. (2006), *Wasp in the forest*. Wind Energy, vol. 9:pp. 211–218.

- [33] Brodeur, P., Masson, C., and Sibuet-Watters, C. (2005), *Numerical simulation of wind distribution over very complex terrain*. In American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA-2006-1362), Reno, Nevada.
- [34] Alinot, C. and Masson, C. (2005), *k-epsilon model for the atmospheric boundary layer under various thermal stratifications*. Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME, vol. 127, 4:pp. 438–443.
- [35] Patankar, S.V. (1980), Numerical heat transfer and fluid flow. Series in computational and physical processes in mechanics and thermal sciences., New-York: McGraw-Hill.
- [36] Fluent (1996), *User's guide*.
- [37] Katul, G. and Wei-han, C. (1999), *Principal length scales in second-order closure models for canopy turbulence*. Journal of Applied Meteorology, vol. 38, 11:pp. 1631–1643.
- [38] Katul, G.G., Mahrt, L., Poggi, D., and Sanz, C. (2004), *One- and two-equation models for canopy turbulence*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 113, 1:pp. 81–109.
- [39] Marcolla, B., Pitacco, A., and Cescatti, A. (2003), *Canopy architecture and turbulence structure in a coniferous forest*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 108, 1:pp. 39–59.
- [40] Li, Z., Lin, J., and Miller, D. (1990), *Air flow over and through a forest edge: a steady-state numerical simulation*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 51, 1-2:pp. 179–97.
- [41] Poggi, D., Porporato, A., Ridolfi, L., Albertson, J.D., and Katul, G.G. (2004), *The effect of vegetation density on canopy sub-layer turbulence*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 111, 3:pp. 565–587.
- [42] Chantelot, A., Delaunay, D., Clarenc, T., and Koulibaly, D. (2006), *Wind ressource assessment in forested and complex terrain*. In European wind energy conference, Athens, Greece.
- [43] Kobayashi, M., Pereira, J., and Siqueira, M. (1994), *Numerical study of the turbulent flow over and in a model forest on a 2d hill*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 53, 3:pp. 357–374.
- [44] Castro, F.A., Palma, J.M.L.M., and Silva Lopes, A. (2003), *Simulation of the askervein flow. part 1: Reynolds averaged navier-stokes equations (k-epsilon turbulence model)*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 107, 3:pp. 501–530.
- [45] Liang, L., Xiaofeng, L., Borong, L., and Yingxin, Z. (2006), *Improved k- $\epsilon$  two-equation turbulence model for canopy flow*. Atmospheric Environment, vol. 40, 4:pp. 762–770.
- [46] Sanz, C. (2003), *A note on k-e modelling of vegetation canopy air-flows*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 108, 1:pp. 191–197.

- [47] Raupach, M.R. and Thom, A.S. (1981), *Turbulence in and above plant canopies*. Annual Review of Fluid Mechanics, vol. 13:pp. 97–129.
- [48] Ayotte, K.W., Finnigan, J.J., and Raupach, M.R. (1999), *Second-order closure for neutrally stratified vegetative canopy flows*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 90, 2:pp. 189–216.
- [49] Shaw, R.H. and Schumann, U. (1992), *Large-eddy simulation of turbulent flow above and within a forest*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 61, 1:pp. 47–64.
- [50] Shen, S. and Leclerc, M. (1997), *Modelling the turbulence structure in the canopy layer*. Agriculture and Forest Meteorology, vol. 87:pp. 3–25.
- [51] Su, H.B., Shaw, R.H., Paw, K.T., Moeng, C.H., and Sullivan, P.P. (1998), *Turbulent statistics of neutrally stratified flow within and above a sparse forest from large-eddy simulation and field observations*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 88, 3:pp. 363–397.
- [52] Dwyer, M.J., Patton, E.G., and Shaw, R.H. (1997), *Turbulent kinetic energy budgets from a large-eddy simulation of airflow above and within a forest canopy*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 84, 1:pp. 23–43.
- [53] Yang, B. (2003), Large eddy simulation of turbulent flow across a forest edge. Ph.d., University of California, Davis.
- [54] Jones, W.P. and Launder, B.E. (1972), *The prediction of laminarization with two-equation model of turbulence*. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 15:pp. 301–314.
- [55] Dalpé, B. and Masson, C. (2006), *Numerical simulation of wind flow near a forest edge*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics (Submitted December 1st).
- [56] Richards, P. and Hoxey, R. (1993), *Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k-e turbulence model*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 46-47:pp. 145–153.